

**det_L'école du
cerveau: De
Montessori,
Freinet et**

Olivier Houdé

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

Olivier Houdé

L'ÉCOLE DU CERVEAU

DE MONTESSORI, FREINET ET PIAGET
AUX SCIENCES COGNITIVES



MARDAGA

**LE LIVRE RÉFÉRENCE
SUR LA NEUROPÉDAGOGIE**

Table des matières

Avant-propos

Introduction

Neuropédagogie, neuroéducation

Beaucoup d'espoirs, mais déjà quelques réserves

Notes

Chapitre I - L'intérêt pour l'enfant en pédagogie à travers l'histoire

John Locke et Jean-Jacques Rousseau : pensées sur l'éducation

Jean Itard et Édouard Séguin : l'éducation spécialisée

Maria Montessori, Célestin Freinet et Ovide Decroly : les pédagogies nouvelles

Alfred Binet, Jean Piaget et Lev Vygotski : les psychologues de l'enfant

Burrhus F. Skinner : du laboratoire à la classe, l'enseignement programmé

Notes

Chapitre II - Sciences cognitives et sciences de l'éducation

La révolution des sciences cognitives

Des sciences de l'éducation peu neuroscientifiques

La psychologie du développement alliée à l'imagerie cérébrale

Quelles découvertes après Piaget ?

Un bébé plus intelligent qu'on ne l'imaginait

Un développement dynamique et non linéaire

Piaget revisité : heuristiques, algorithmes exacts et inhibition

Les grands principes d'apprentissage du cerveau humain

L'éducation, la plasticité et le recyclage neuronal

L'engagement actif : curiosité, retour d'information, émotion et correction d'erreurs

La mémoire et la consolidation : espacement des apprentissages et rôle du sommeil

L'automatisation et le contrôle inhibiteur dans les apprentissages scolaires

L'éveil du beau

Notes

Conclusion

Notes

Remerciements

Bibliographie

Olivier Houdé

L'ÉCOLE DU CERVEAU

DE MONTESSORI, FREINET ET PIAGET
AUX SCIENCES COGNITIVES



MARDAGA

LE LIVRE RÉFÉRENCE
SUR LA NEUROPÉDAGOGIE

Olivier Houdé

L'ÉCOLE DU CERVEAU

De Montessori, Freinet et Piaget
aux sciences cognitives

MARDAGA

Avant-propos

Un tableau du peintre belge René Magritte (1898-1967), intitulé *La Condition humaine* (1935), est en tout point remarquable pour notre propos. En un clic vous le trouverez sur Internet. Conservez-le sous les yeux un instant car, étonnamment, ce tableau peut déjà symboliser la neuropédagogie. D'abord parce qu'il représente l'allégorie de la caverne de Platon qui sera le point de départ de la partie historique de ce livre. Le philosophe grec avait bien compris que l'intelligence, la cognition, consistait à se détourner, se libérer, des ombres, c'est-à-dire des illusions perceptives, des croyances, que le feu projetait sur le fond de la caverne, pour cheminer vers la lumière extérieure, paysage de la beauté et de la vérité. Mais Magritte, par un coup de génie que certains ont trouvé énigmatique, peint aussi et surtout un très léger décalage surréaliste, qui est la forme d'une toile (dans le tableau) sur un chevalet face au paysage de la beauté et de la vérité !

On peut voir toute la condition humaine, en particulier la neuropédagogie, dans ce fin décalage. Mieux, elle le crée. C'est toujours le cerveau du peintre – et donc de l'Homme – qui reconstruit et représente la « vérité ». Chaque enfant qui naît a un petit chevalet, une toile, des couleurs et un pinceau, pour reconstruire, durant son développement, une (sa) représentation du monde. Le chemin du vrai, comme du beau et du bien, passe toujours par celui qui le pense ou le saisit.

Le rôle de l'éducation, comme l'indique son étymologie latine (*educere*), est de « guider », « conduire hors »... mais pas, comme le croyait Platon, pour admirer des Idées intemporelles d'origine divine ; simplement pour penser le monde contemporain avec nos réseaux de neurones. Construire son intelligence dira Piaget ; y aider l'enfant par le jeu ou le travail dans un environnement pédagogique favorable à son élan vital (le chevalet) diront Montessori et Freinet.

Aujourd'hui les sciences cognitives précisent ce processus (le léger décalage de Magritte) en termes de constructivisme neuronal, visualisé

par l'imagerie cérébrale, tel que le montre Jean-Pierre Changeux dans *Du vrai, du beau, du bien : une nouvelle approche neuronale* (2008) ou dans *La beauté dans le cerveau* (2016).

De Platon aux sciences cognitives, c'est cette fabuleuse histoire et son développement récent pour la neuropédagogie que je veux retracer ici.

Aviez-vous remarqué, en regardant le tableau sur votre ordinateur, votre smartphone ou peut-être au musée, que la forme de l'ouverture de la caverne dessinée par Magritte ressemble à un cerveau ?

Introduction

Les frontières des sciences humaines et sociales se renouvellent aujourd'hui, en particulier pour l'éducation scolaire éclairée par les sciences cognitives et les neurosciences. Dans cet esprit, au début des années 2000, à l'issue de la première démonstration par imagerie cérébrale de l'impact d'une intervention pédagogique (un apprentissage cognitif) sur le cerveau des élèves lors d'un processus de raisonnement (Houdé *et al.*, 2000), j'ai introduit en France le terme de « neuropédagogie »¹. Il est strictement synonyme de celui de « neuroéducation », souvent utilisé depuis (par exemple, Eustache & Guillery-Girard, 2016, pour la mémoire).

En France, en 2005, l'Académie des sciences consacrait déjà un colloque à cette approche nouvelle (publié sous le titre *Éducation, sciences cognitives et neurosciences*, Ajchenbaum-Boffety & Léna, 2008). En 2017, l'Académie royale de Belgique m'a invité à donner deux leçons du Collège Belgique, pour un « premier bilan à presque 20 ans », sur le thème « La neuroéducation : Une nouvelle science pour l'école ? »².

Dans le monde anglo-saxon, beaucoup d'ouvrages de référence ont été publiés sur ce sujet durant la même période, notamment *The Learning Brain: Lessons for Education* (Blakemore & Frith, 2005), *Educating the Human Brain* (Posner & Rothbart, 2007), *Neuroscience in Education: The Good, the Bad and the Ugly* (Della Sala & Anderson, 2011) et *The Learning Brain: Memory and Brain Development in Children* (Klingberg & Betteridge, 2012)³.

En 2005, la revue américaine *Science* publiait un éditorial d'Elsbeth Stern intitulé « La pédagogie rencontre les neurosciences », et, en 2014, la revue britannique *Nature Neuroscience* publiait un article de Mariano Sigman et collaborateurs intitulé « Neurosciences et éducation : Le meilleur moment pour construire le pont » !

En outre, deux revues scientifiques dédiées à la neuroéducation

ont été créées durant la dernière décennie : *Mind, Brain and Education* par Wiley en 2007 et *Trends in Neuroscience and Education* par Elsevier en 2012. Cet éditeur a aussi créé en 2011 une revue à l'interface de la psychologie du développement de l'enfant et des neurosciences : *Developmental Cognitive Neuroscience*, dont le facteur d'impact n'a depuis cessé de croître.

Autant d'éléments qui confirment la naissance internationale d'un nouveau domaine de recherche et d'application (Meltzoff *et al.*, 2009, *Foundations for a new science of learning*), même si ce secteur est encore très jeune. Mais l'est-il vraiment ?

Neuropédagogie, neuroéducation

La pédagogie est un art qui doit s'appuyer sur des connaissances scientifiques actualisées. En apportant des indications sur les capacités et les contraintes du cerveau qui apprend, la psychologie expérimentale du développement de l'enfant et les neurosciences cognitives peuvent aider à expliquer pourquoi certaines situations d'apprentissage sont plus efficaces que d'autres. En retour, le monde de l'éducation, informé qu'il est de la pratique quotidienne (l'actualité de la pédagogie), peut suggérer des idées originales d'expérimentation. Ainsi se développe aujourd'hui un aller-retour du labo à l'école. Ces découvertes commencent aussi à être enseignées aux étudiants des Écoles supérieures du Professorat et de l'Éducation (ESPE) en France. Une dynamique comparable se met en place, de l'école à l'université, en Belgique, en Suisse et au Canada⁴, pays francophones visés par cet ouvrage.

Un tel intérêt porté à l'élève et à son cerveau, en termes d'attentes, de contraintes et de potentiel d'apprentissage, renoue avec l'esprit des pionniers des pédagogies nouvelles du xxe siècle tels Maria Montessori en Italie, Célestin Freinet en France et Ovide Decroly en Belgique. Il amène aussi à revisiter les contributions marquantes des grands psychologues de l'enfant, de l'apprentissage et de l'éducation : Alfred Binet en France, Jean Piaget en Suisse, Lev Vygotsky en Russie et Burrhus F. Skinner aux États-Unis.

Aucun livre scientifique en français, à ce jour, ne tente une synthèse, brève et accessible, de ces contributions historiques et des apports nouveaux des sciences cognitives à propos du cerveau qui apprend. C'est l'objectif de cet ouvrage destiné aux élèves instituteurs (ou professeurs des écoles dit-on en France) en formation initiale et aux instituteurs eux-mêmes en formation continue, de même qu'aux enseignants en général, y compris du secondaire (le collège et le lycée).

Les étudiants, enseignants et chercheurs en psychologie et en sciences de l'éducation devraient aussi y trouver une synthèse utile

pour aller plus loin en réalisant des études scientifiques nouvelles. Les parents et le monde de l'éducation (les éducateurs spécialisés par exemple) y trouveront, quant à eux, des clés pour mieux comprendre, à partir de la connaissance du cerveau, les comportements d'apprentissage et les chemins de pensée des enfants.

Mais c'est avant tout aux élèves instituteurs en formation initiale que ce livre s'adresse, me rappelant la joie intense que j'ai éprouvée à lire en 1983 un livre de Piaget (*La formation du symbole chez l'enfant*, 1945), alors que je terminais mes études d'instituteur en Belgique, à l'école normale Saint-Thomas de Bruxelles, aujourd'hui appelée Haute École Galilée⁵. C'est cette joie, mieux cette révélation, que peut-être certains d'entre vous ressentiront, je l'espère, en prenant connaissance du champ extraordinaire qu'ouvrent aujourd'hui les sciences cognitives et du cerveau pour l'éducation.

Beaucoup d'espoirs, mais déjà quelques réserves

L'engouement pour la neuroéducation est tel qu'il faut toutefois d'emblée calmer les ardeurs. Je l'ai récemment fait dans une chronique du magazine *Cerveau & Psycho* intitulée « L'école des cerveaux : la neuroéducation, magie ou science ? ». À propos du livre à grand succès de Céline Alvarez, *Les lois naturelles de l'enfant* (Les Arènes, 2016), j'y rappelais la nécessité d'évaluations scientifiques sérieuses de l'impact pédagogique « hors laboratoire » de telles applications pratiques des sciences cognitives et du cerveau à l'école.

Si l'on veut une approche rigoureuse, la méthode expérimentale stricte doit s'appliquer ici, autant que possible, en sciences de l'éducation ou neuroéducation comme elle s'applique en sciences médicales depuis Claude Bernard au ^{xix}e siècle (on parle aujourd'hui d'*evidence-based medicine* en anglais). Il faut, premièrement, un pré-test et des post-tests immédiats et différés, strictement identiques, et, deuxièmement, l'ensemble du protocole pédagogique expérimental mis en parallèle avec un groupe contrôle en tout point apparié. C'est le b.a.-ba d'une *evidence-based education* fondée sur les résultats de la recherche.

Le neuropsychologue Xavier Seron a rédigé en 2011 un texte critique sur la neuropédagogie à propos de son champ d'expertise : les mathématiques (dans l'ouvrage, déjà cité, de Della Sala & Anderson). Il y montre, de façon très documentée, que la complexité des interprétations cognitives et comportementales des activations cérébrales, ainsi que les contradictions entre chercheurs sur ces mêmes interprétations, rendent encore difficiles, voire risquées, les transpositions pédagogiques. Le psychologue cognitiviste Michel Fayol a émis des réserves comparables, soulignant que l'analyse classique des comportements des élèves et des performances réalisées, en suivi transversal (par groupes d'âge) et/ou longitudinal (les mêmes enfants à travers les âges), reste actuellement plus efficace que le passage, encore trop hypothétique, par le cerveau. Ces objections sont résumées, avec d'autres, dans une très bonne *Enquête sur la neuropédagogie* (2016) réalisée par la journaliste de sciences humaines

Toutefois, les professeurs des écoles, doués eux-mêmes d'esprit critique, ne prenant pas la (neuro)science pour « argent comptant », décelant les contradictions par rapport à leurs expériences de terrain (ou leurs lectures croisées), mais avides de formation, ont déjà le désir légitime d'éclairer leurs pratiques, de les améliorer, par les connaissances et théories scientifiques (c'est-à-dire validées, publiées) nouvelles sur le cerveau des élèves. Et cela en relation étroite avec l'analyse classique des comportements et des performances.

Nous, psychologues et neuroscientifiques, avons dès lors le devoir de les éclairer en cette matière (en accord avec Ansari *et al.*, 2012 ; Sigman *et al.*, 2014), tout en reconnaissant (i) la part d'incertitude de ces données nouvelles, (ii) la nécessité d'une évaluation scientifique des dispositifs pédagogiques qui en seraient déduits et, surtout, (iii) en les mettant en perspective avec les connaissances et théories classiques qu'ils ont déjà acquises (parfois, ici, confortées, nuancées ou au contraire invalidées), notamment en psychologie du développement de l'enfant, de l'apprentissage et de l'éducation. Il ne s'agit pas de tout réinventer ou révolutionner, mais de compléter l'édifice historique des sciences de l'éducation, au sens le plus solide du terme, c'est-à-dire aujourd'hui neuroscientifique. Comme le disait Maurice Merleau-Ponty au Collège de France au milieu du ^{xx}e siècle, il s'agit « d'enseigner la science en train de se faire » (c'est devenu la devise de cette prestigieuse institution). Adoptons, en ce début de ^{xxi}e siècle, la même démarche pour les sciences cognitives et du cerveau auprès des enseignants, de l'école maternelle à l'université. C'est l'objectif de ce livre.

Dans le domaine spécifique des mathématiques évoqué par Seron, d'autres neuroscientifiques proposent déjà des pistes concrètes, même des logiciels, pour l'éducation : par exemple, Stanislas Dehaene, professeur au Collège de France, dans *La bosse des maths, 15 ans après* (2010) – avec son logiciel *La course aux nombres* (Wilson *et al.*, 2006) –, donne des indications précises pour comprendre et aider les enfants qui rencontrent des difficultés à calculer ; il en fait de même pour la lecture, dans *Les neurones de la lecture* (2007) et *Apprendre à lire : des sciences cognitives à la salle de classe* (2011 ; voir aussi Gabrieli, 2009,

pour la dyslexie dans la revue *Science*).

Un dernier point de réserve à propos de la neuropédagogie qu'il faut évoquer et dénoncer d'emblée, de la façon la plus ferme, est celui des neuromythes, c'est-à-dire des fausses croyances, pseudoscientifiques, sur le cerveau, véhiculées sur Internet ou dans des magazines, soit par l'inexactitude de la vulgarisation des données de la recherche, la simplification à outrance ou, pire, l'imposture et la marchandisation de méthodes pédagogiques « bidon » visant à « muscler le cerveau ». Nous n'allons pas énumérer ici ces neuromythes, car cela les ancrerait plus encore dans l'esprit des lecteurs ! Toutefois, si, par curiosité, vous vouliez les connaître consultez le livre d'Elena Pasquinelli *Mon cerveau, ce héros : Mythes et réalité* (2015) ou l'article sur le même thème d'Howard-Jones (2014).

C'est, *a contrario*, ce qu'il y a de plus confirmé scientifiquement et consensuel comme « éléments de neuropédagogie » qui vous sera présenté dans les chapitres à venir – avec la vision et les choix de l'auteur bien entendu. Mais avant d'aller à l'actualité de la recherche, retournons aux racines historiques de l'intérêt pour l'enfance, sa psychologie, son intelligence et la façon de l'éduquer par des pédagogies appropriées. Ce sont les véritables racines des sciences cognitives et du cerveau en la matière. Mieux, c'est leur écrin.

Notes

1 Entretien dans *Le Monde de l'Intelligence*, 2006, n° 3, p. 24-25. Voir aussi l'entrée « Neuropédagogie » dans *Les 100 mots de la psychologie* (Houdé, 2008, réédition actualisée, 2018) et Houdé (2007, 2008) pour deux publications anglaises sur la neuropédagogie dans *Thinking & Reasoning* et *Trends in Cognitive Sciences*.

2 Leçons prononcées à Bruxelles les 21 et 22 novembre 2017.

3 Voir aussi *The Educated Brain: Essays in Neuroeducation* (Battro et al., 2008) et *Mind, Brain, and Education Science: A Comprehensive Guide to the New Brain-Based Teaching* (Tokuhamu-Espinosa, 2010).

4 Par exemple, le magazine *Éducation Canada* (n° 55) y a consacré un dossier intitulé « Que nous apprend la neuroscience ? » à l'automne 2015 et, au Canada également, la revue professionnelle *Vivre le primaire* (n° 29) y a consacré un dossier intitulé « Quand le cerveau entre à l'école » à l'automne 2016.

5 Je réalisais alors un mémoire sur les prérequis à l'apprentissage de la lecture dans le cadre de la pratique d'une classe Freinet à Louvain-la-Neuve (éléments autobiographiques détaillés dans L. de Kerchove & A. Ricou, 2012, *Parcours de Psy*, Paris, Éditions Le Cavalier Bleu, p. 75-90).

6 Dans M. Fournier (2016). *Éduquer et former* (Auxerre : Sciences Humaines Éditions, p. 173-177). Cette enquête est très équilibrée, mettant autant en avant les avancées positives et tangibles, les acteurs qui les incarnent (tels S. Dehaene ou l'auteur de ce livre), que les réserves formulées. Dans la presse, la parution d'articles enthousiastes ou, au contraire, à charge s'intensifie : par exemple dans *Le Monde* du 25 mai 2016 (Cahier « Science & médecine ») : « La neuroéducation peut-elle sauver l'école ? » (article équilibré), ou toujours dans *Le Monde* du 8 décembre de la même année : « Neuroéducation, pourquoi ça ne prend pas ? » (article à charge), ou encore dans *Le Point* du 22 juin 2017 : « Quand les neurosciences révolutionnent l'éducation » (article enthousiaste) qui vient à l'appui de la vision du nouveau ministre français de l'Éducation nationale, Jean-Michel Blanquer, très pro-neurosciences cognitives (voir ses ouvrages, *L'École de la vie et L'École de demain*, Paris, Odile Jacob, 2014 et 2016). Tout cela révèle que les attentes sont fortes, voire trop impatientes (d'où des déceptions, parfois mises en scène par les détracteurs) et que l'intérêt est croissant malgré le scepticisme, souvent de rigueur.

Chapitre I

L'intérêt pour l'enfant en pédagogie à travers l'histoire

Il faut remonter à l'Antiquité pour une histoire sérieuse et complète sur ce sujet, comme nous avons tenté de le faire dans le manuel *L'Homme en développement* (Bideaud *et al.*, 2004). Récemment, dans *Histoire de la psychologie* (Houdé, 2016a), j'ai souligné combien le rôle de l'éducation était au cœur de l'allégorie de la caverne chez le philosophe grec Platon (428-347 av. J.-C.). Revenons ici à ce mythe.

Par cette allégorie, Platon illustre la démarche intellectuelle que l'Homme, prisonnier de sa caverne, doit suivre pour (re)monter des percepts aux Idées (Bien, Vrai et Beau), de l'ici-bas à l'au-delà, car les choses concrètes que nous percevons n'existent, en fait, que comme des imitations ou des reproductions, des reflets des Idées. Ainsi, des prisonniers (nous, les enfants), enchaînés et immobilisés dans une profonde caverne, tournant le dos à l'entrée, ne voient sur la paroi du fond que les ombres d'objets fabriqués portés par des esclaves devant un feu. Ces objets fabriqués reflètent ou représentent des objets concrets : les prisonniers ne perçoivent donc que des reflets de reflets (le monde des apparences). Une fois délié, l'un d'entre eux pourra aller vers la lumière du monde des Idées à l'extérieur, c'est-à-dire au-delà des objets fabriqués, en contournant à la fois les esclaves qui les portent et le feu qui crée leurs ombres.

Il faudra néanmoins forcer le prisonnier à y aller, car la lumière de l'extérieur est éblouissante. Platon métaphorise ainsi le rôle de l'éducation et de la société qui doivent être des forces agissantes, même par la contrainte. Une fois accoutumé, l'ancien prisonnier prendra conscience de sa pleine condition de philosophe, puisqu'il a aperçu la lumière du Soleil-Bien qui éclaire les Idées. Toutefois, il doit

encore agir selon la loi de la Cité, c'est-à-dire pour le bien des autres, en redescendant auprès des prisonniers du bas (dans le concret !). Ainsi, selon Platon, seul celui qui saisit les véritables raisons des choses, les Idées, peut ensuite expliquer ces raisons, éduquer et gouverner dans la Cité. C'est l'unique façon de bien diriger un État.

Comme le souligne Jean Château dans *Les grandes psychologies dans l'Antiquité* (1978), Platon avait déjà bien compris que l'intelligence (la cognition dirait-on aujourd'hui) est un détour forcé. Ce détour permet à l'esprit humain, grâce à la dialectique (discussion argumentée, raisonnement, voir Socrate), de contourner les contradictions du faux savoir, du sensible et des apparences. C'est une psychologie de la vérité : la recherche d'un savoir stable dans le temps, immuable, distinct de l'opinion variable et subjective (*doxa*) des sophistes et des hommes politiques de l'époque. Platon avait aussi perçu que l'intelligence doit toujours revenir chercher appui dans le concret. Mais pour Platon, tout cela (l'aptitude au détour et au retour) dépend fortement des différences, aussi bien de nature que d'éducation, entre les hommes. Il s'agit déjà ici d'une psychologie différentielle, c'est-à-dire d'aptitudes intellectuelles et morales plus ou moins favorisées par l'environnement social.

Ainsi, Platon qualifiait sa méthode éducative (appliquée dans l'Académie qu'il avait créée à Athènes) de « grand détour » ou de « vaste circuit ». Elle débutait par des sortes de jardins d'enfants à 7 ans (musique, danse, chant choral et gymnastique) éveillant à l'harmonie du corps et de l'esprit, puis suivaient, à partir de 10 ans, les études littéraires et mathématiques ; ensuite, à partir de 18 ans, la formation physique et militaire (pour défendre la Cité), puis, dans la maturité de l'âge adulte, les sciences, les mathématiques dites « transcendantes », la dialectique et, tout à la fin, un stage dans les affaires publiques (« le retour »), l'ensemble jusqu'à 50 ans. C'est le temps qu'il faut pour faire un homme, disait-il !

Entre Platon et Locke ou Rousseau que nous allons redécouvrir plus loin, bien d'autres philosophes de l'éducation devraient être cités, tels saint Augustin, de l'Antiquité au Moyen Âge, ou Montaigne à la Renaissance (pour l'apport de ces auteurs en psychologie et en sciences de l'éducation, voir Château, 1978 ; Houdé, 2016a ; La

Borderie, 2005). Platon a toutefois d'emblée tout posé pour notre livre sur la neuropédagogie : (i) l'intelligence comme un effort cognitif du cerveau (car il était déjà cérébrocentriste !), (ii) avec l'aide d'autrui – aide forcée, « pour la bonne cause », comme l'est l'école obligatoire depuis Jules Ferry –, (iii) les différences individuelles et (iv) le rôle de l'environnement social.

Soulignons que Platon était de façon originale, clairvoyante, cérébrocentriste, alors que le cardiocentrisme prévalait encore (le cœur, siège de l'âme et de la pensée). Il situait, en effet, la partie rationnelle de l'âme (esprit, intellect, raison) dans la tête : c'est le cerveau qui donne accès aux Idées ! Un historique général du rôle attribué au cerveau depuis l'Antiquité est détaillé dans *Cerveau et psychologie* (Houdé *et al.*, 2002). Tant pour ce rôle attribué au cerveau qu'à la pédagogie (éducation du prisonnier de la caverne, des enfants et des hommes), Platon est sans doute le premier – ou l'ancêtre lointain – des neuropédagogues, précurseur plus généralement des (proto)neurosciences dans l'Antiquité avec les médecins grecs Hérophile et Galien (même si Changeux, aujourd'hui, lui reproche toujours, à juste titre, son dualisme essentiel entre le monde immatériel des Idées et le monde réel et naturel).

John Locke et Jean-Jacques Rousseau : pensées sur l'éducation

Contre Descartes qui, comme Platon, croyait encore aux Idées innées d'origine divine à redécouvrir (la réminiscence), John Locke (1632-1704), philosophe anglais du XVII^e siècle, était empiriste. Cela veut dire que, selon lui, les Idées innées n'existent pas et que tout s'acquiert par l'expérience sensible dans l'environnement. Les expériences et sensations de l'enfant vont dès lors s'imprimer sur une « table rase » qui est l'état de départ du développement, c'est-à-dire l'esprit (ou le cerveau) à la naissance (hypothèse de la *tabula rasa* déjà présente dans la philosophie d'Aristote, élève de Platon à l'Académie). Locke reconnaissait toutefois que tous les enfants n'étaient pas égaux au départ, attribuant ces différences à la nature.

Locke était médecin pédiatre et précepteur des enfants d'un homme politique important en Angleterre, Lord Ashley. Ce qu'il visait était la formation d'un jeune *gentleman* anglais (mais il comprenait aussi par-là combien chaque culture et chaque époque ont leur enfance), d'où sa psychologie de l'enfant et de l'éducation, corollaire de son empirisme. Locke était frappé, comme Montaigne, du poids des coutumes, des habitudes et du rôle des circonstances. De ses observations, de ses voyages, des récits qu'il entendait, il a déduit que l'entendement humain était une question d'environnement et d'éducation.

Ainsi, dans son *Essai sur l'entendement* humain (1690), il décrit un mécanisme d'association. Ce que voulait découvrir Locke, dans la lignée de l'esprit scientifique newtonien et contre Descartes, était un mécanisme psychologique simple, une loi de fonctionnement qui règle l'esprit, l'espace mental. C'était l'association entre sensations (issues de l'environnement) et idées, et entre idées elles-mêmes. L'association régit ainsi le « monde des idées », autrement dit celui de la psychologie, à l'image du mécanisme de gravitation de Newton, dont la physique régit la chute des corps et les rapports entre corps célestes. Par son œuvre, Locke accédait à une requête que Newton avait exprimée dans les *Principia* (1687) : trouver pour l'esprit, comme il

l'avait fait pour l'espace, un et un seul principe universel de fonctionnement.

Toutefois, ce principe ou mécanisme d'association impliquait, nécessairement, une psychologie de l'éducation. C'est ce que Locke proposa dans *Quelques pensées sur l'éducation* (1693), où il dessine une psychologie de l'enfant. Avec une table rase comme point de départ, Locke comprit que les puissances (*powers*) de l'esprit réclamaient, pour se développer, des incitations sociales et des modèles. Le mécanisme s'éduque ! Il insistait dès lors sur le rôle de l'imitation et du jeu. Une éducation bien comprise doit user de jeux à la fois libres et laborieux, mais elle doit réserver une place à l'imitation spontanée. Ce qui fascinait Locke chez les enfants, c'était leur élan, cette force enfantine qui fuse dans l'action, le jeu et même le travail scolaire. Dans l'action, comme dans le jeu, c'était, pour lui, l'expression d'une liberté.

Locke avait tout d'un psychologue de l'enfant, mais il effleurait seulement ce qui est essentiel : les cadres de l'esprit. Tel fut le problème général de l'empirisme anglo-saxon : au-delà du contenu mental des connaissances (les idées), y a-t-il un centre actif de l'esprit, des structures auxquelles s'accrochent les idées (un cerveau) ? Locke en était proche lorsqu'il évoquait chez l'enfant (dans la continuité d'Aristote) des puissances (*powers*) aussi bien de sentir que de réfléchir. Mais il ne disait rien sur la façon dont ces puissances sensibles et cognitives étaient structurées (ou se structuraient) dans l'esprit. Revenant à l'innéisme de Descartes, Kant dira ensuite qu'elles sont préfabriquées : il s'agira pour lui des a priori de l'entendement, alors que Piaget, au ^{xx}e siècle, découvrira, au contraire, les lois de construction des structures (ou cadres) logico-mathématiques au cours du développement. De l'empirisme, on passera au constructivisme.

Inspiré par Locke, Jean-Jacques Rousseau (1712-1778), le célèbre philosophe francophone du Siècle des Lumières (originaire de Genève), est l'un des plus grands penseurs de l'éducation. C'est même, pour beaucoup, l'indétrônable inspirateur du courant de l'éducation nouvelle (Montessori, Freinet, etc.)¹. Son angle était différent et complémentaire de celui de Locke.

Dans l'*Émile* (1762), Rousseau formule des conseils pour

l'éducation des enfants que la société pervertit. Après des conditions de vie naturelles dès la naissance et un allaitement maternel (contre la mise en nourrice), l'enfant choyé et préservé doit être confié, dès que possible, à un précepteur. Celui-ci l'élèvera à la campagne en veillant à ce qu'on ne lui donne pas de mauvaises habitudes. Pas de morale, pas de devoirs écrits, peu ou pas de lectures, mais des causeries, des expériences préparées, des leçons de choses (« Les choses ! Les choses ! »). Émile apprendra l'idée de propriété en conversant avec le jardinier. S'il casse la vitre de sa chambre dans un accès de colère, pas de réprimandes : il aura froid la nuit et saura qu'il a commis une sottise. On doit laisser agir la nature ; le rôle du précepteur est de faire naître et d'entretenir les occasions d'interaction avec le monde physique. C'est d'ailleurs du spectacle des lois de la nature et de sa beauté que l'éducation tire tout son enseignement : astronomie, physique, morale et religion. L'acceptation de la dépendance nécessaire à l'égard du monde physique entraînera d'elle-même une adaptation saine aux contraintes sociales. Émile abordera la société vers l'âge de 16 ans, armé d'une conscience pure qui le préservera de la contagion. Plus tard, il rencontrera Sophie, une jeune fille élevée dans les mêmes conditions, qu'il aimera et épousera. Et le précepteur restera dans la maison pour faire l'éducation de leurs enfants...

Si certains développements de l'*Émile* font sourire, il n'en reste pas moins que l'enfance prenait, avec Rousseau, une réalité propre, avec des valeurs différentes de celles de l'état adulte, et des valeurs sûres. C'est dans la mesure où l'enfant s'épanouit dans sa spécificité, à chaque étape de son développement, qu'il prépare un adulte bon et socialement bénéfique. On assistait là, du point de vue des regards posés sur l'enfant, à une véritable révolution. C'est dans ces pas que s'inscriront tous les grands pédagogues jusqu'à ce jour.

Jean Itard et Édouard Séguin : l'éducation spécialisée

Outre Rousseau, Locke a inspiré le médecin français Jean Itard (1774-1838), connu pour son travail sur l'éducation spécialisée : le cas de l'enfant sauvage, Victor de l'Aveyron. Cet enfant abandonné nu dans une forêt, retrouvé après de multiples épisodes (voir Malson, 2011), réfugié dans un village de l'Aveyron, puis transféré à Paris pour son examen, fut diagnostiqué « d'idiotisme incurable » par le Docteur Pinel, alors grand spécialiste de l'aliénation mentale.

Mais Itard, profondément convaincu par l'approche empiriste et pragmatique de Locke, ainsi que par celle dite « sensualiste » de Condillac en France (*Essais sur l'origine des connaissances humaines*, 1746), ne désarma pas face au cas de cet enfant sauvage et pensa qu'un programme stimulant de sensations, d'expériences et d'associations intenses viendrait à bout de son mutisme. Pour cela, il développa une véritable boîte à outils pédagogiques, de manière à ce que ces stimulations amènent le jeune Victor à penser et à parler : des jouets éducatifs, un puzzle pour la lecture, des situations concrètes de la vie quotidienne visant à introduire de l'arithmétique ou, encore, de la menuiserie pour les apprentissages moteurs. Pour le langage, par la répétition, mais en vain, Itard voulait apprendre à Victor l'association entre les mots et les objets.

Victor de l'Aveyron mourut à l'âge de 40 ans, capable d'effectuer des travaux ménagers et jardiniers, de ressentir et d'exprimer des émotions et sentiments, mais pas de parler (car trop tard ou en raison d'un déficit cérébral non identifié).

Par ce travail pédagogique auprès de Victor, ainsi que d'autres enfants de l'Institut des sourds-muets à Paris, Itard a fondé le principe de l'éducation spécialisée qui, aujourd'hui encore, déploie de multiples dispositifs pour faire bénéficier tous les enfants, même avec de grandes difficultés ou handicaps spécifiques, d'une éducation scolaire de la meilleure qualité possible. Pour cela, la loi des différents pays prévoit maintenant des lieux (maisons, centres, instituts, etc.) et

des personnels – tels les enseignants spécialisés et psychologues dans les établissements scolaires – afin de garantir une égalité des droits et des chances de tous pour l'éducation. L'idée forte sous-jacente est le « postulat d'éducabilité ». Itard l'appliquait avec ardeur à Victor – fort des convictions de Locke et de Rousseau sur le soin, l'attention et le tutorat pédagogique à apporter aux enfants.

Il eut immédiatement un émule au XIX^e siècle, le pédagogue français Édouard Séguin (1812-1880) qui fut à l'origine en France et aux États-Unis de l'éducation des personnes handicapées mentales, dites « déficientes intellectuelles ». Dans ces deux pays, Séguin est connu pour ses travaux fondateurs auprès d'enfants ayant des troubles cognitifs. À Paris, il a créé, au milieu du XIX^e siècle, la première école privée dédiée à l'éducation des déficients intellectuels. Ce sera une source d'inspiration majeure, quelques décennies plus tard, pour la pédagogue et médecin italienne Maria Montessori.

C'est ce postulat d'éducabilité dans une « société inclusive » (tout enfant peut apprendre et grandir) qui conduit par exemple aujourd'hui un grand spécialiste, généticien et cognitiviste, de l'autisme comme Thomas Bourgeron en France (Institut Pasteur, Paris) à dénoncer le retard de son pays en matière d'accueil des enfants autistes à l'école. Il souligne, avec les familles concernées, qu'on ajoute encore trop souvent l'exclusion au handicap². C'est aussi dans cet esprit d'éducabilité issu d'Itard qu'en ce début de XXI^e siècle des centres scolaires nouveaux sont créés pour utiliser les concepts et méthodes issus des sciences cognitives et du cerveau afin d'apporter une lecture inédite des besoins pédagogiques des élèves avec troubles des apprentissages : dyslexie, dyscalculie, dyspraxie et déficit d'attention/hyperactivité³. Les écoles pilotes d'Hervé Glasel à Paris, ainsi que son ouvrage *Une école sans échec : L'enfant en difficulté et les sciences cognitives* (2013), sont emblématiques à cet égard.

On voit ainsi la portée de l'approche d'Itard (ou Locke-Rousseau-Itard), du regard particulier envers Victor de l'Aveyron à celui, actuel, des sciences cognitives sur les enfants en difficulté et handicap en général.

Maria Montessori, Célestin Freinet et Ovide Decroly : les pédagogies nouvelles

Le XIX^e siècle a également vu la naissance, en Italie, de Maria Montessori (1870-1952), qui devint, après des études de sciences et de médecine, la toute première femme médecin du pays en 1896. C'était un exploit à l'époque qui, même dans les milieux très aisés comme le sien, n'encourageait pas du tout les jeunes femmes à un tel cursus. Très rapidement, son affectation d'assistante en service hospitalier psychiatrique l'a conduite à être confrontée à la situation d'enfants, petits et grands, déficients mentaux, dits « arriérés » ou « idiots », traités comme des aliénés et quasiment abandonnés à leur sort, ce qui la scandalisa.



Portrait de la pédagogue italienne Maria Montessori (1870-1952).

C'est alors, tout naturellement, dans les œuvres des Français Itard et Séguin qu'elle trouva l'inspiration théorique et les ébauches concrètes de solutions pour sauver ces enfants de leur misère psychique et pédagogique, davantage que médicale. Il y a ainsi une filiation quasi directe « Locke-Rousseau-Itard-Séguin-Montessori » ! Cette dernière adapta et enrichit très vite les méthodes d'Itard et Séguin, citées plus haut, et obtint des résultats spectaculaires : ses enfants dits « arriérés » ou « idiots » purent apprendre à lire et à écrire, puis à se présenter aux mêmes examens que les enfants « normaux ». Son approche était à la fois médicale par son entrée, mais aussi scientifique, psychologique, pédagogique et surtout pragmatique.

La renommée de Montessori fut rapide, notamment par ses nombreuses conférences sur les enfants dont elle s'occupait. Elle comprit aussi que sa méthode, consistant à créer un environnement pédagogique plus favorable constitué d'un matériel d'éveil sensoriel à la lecture et à l'écriture, adapté à l'élan vital et au rythme de chaque enfant, était en fait valable pour tous les enfants, en dehors de l'institution hospitalière ! Cette intuition put être validée lorsqu'en 1907, Maria Montessori, alors âgée de 37 ans, fut invitée par le ministre de l'Éducation à fonder, dans un quartier difficile de Rome, une école pour les enfants (de 4 à 10 ans environ) d'un milieu défavorisé d'immigrants d'Italie du Sud – les parents étaient pour beaucoup illettrés. Ces enfants, livrés à eux-mêmes, furent accueillis dans la *casa dei bambini* (« maison des enfants ») créée par Montessori et des éducatrices qu'elle forma d'emblée pour appliquer sa méthode.

La décoration de l'école-laboratoire était soignée et le mobilier adapté : des tables et des chaises à la taille des petits, comme on en trouve aujourd'hui dans toutes les écoles maternelles. Le matériel aussi : boîtes de couleurs, boîtes à bruits, clochettes musicales, emboîtements cylindriques, empilement d'une tour, tiroirs et cadres de formes géométriques, jeux des rectangles, triangles, polygones, lettres rugueuses et alphabet mobile, chiffres et boîtes à fuseaux – un véritable trésor pédagogique, le tout dans une « ambiance épurée » (telle une « esthétique pédagogique ») ! Avec ce matériel montessorien précieux, l'éducation des petits passait par les sens, les gestes et

l'attention. Le but était de leur proposer des tâches cognitives un peu difficiles, sans qu'elles n'excèdent trop leurs possibilités, en les aidant avec bienveillance à trouver leur autonomie : « être aidé et non servi ». Du point de vue social, la vie scolaire devait se dérouler dans l'ordre et le calme, avec un seul principe : donner à sa propre liberté (ses choix, ses envies d'apprendre) la limite de l'intérêt collectif.

Le succès fut retentissant sur le plan mondial et alimenta un nouveau courant pédagogique dit de l'éducation nouvelle (dont le premier congrès international se tint en 1921 à Calais en France). Contre l'enseignement traditionnel, Montessori estimait que l'intelligence se construisait par l'action – soulignant l'importance de la main – et l'éveil sensoriel, à la suite de Locke, et, comme John Dewey (1859-1962) aux États-Unis, selon son principe *Learning-by-doing*, en suivant des « périodes sensibles », propices à certaines acquisitions (parler, écrire, lire, ranger, sérier, etc.), préfigurant ainsi les stades de développement de Piaget. À cet égard, outre *Le manuel pratique de la méthode Montessori* (1914, 1939, traduit en français seulement en 2016), sa contribution la plus marquante et profonde à la psychologie du développement fut son livre *L'enfant* (1936, réédité régulièrement depuis 2004). L'esprit scientifique de Montessori se manifeste aussi dans *La méthode de la pédagogie scientifique* (1909) et ses principes éducatifs fondamentaux dans *Anthropologie pédagogique* (1910), intitulé d'un cours qui lui fut confié en 1904 à l'Université de Rome.

Montessori voyagea dans le monde entier, ouvrant des centaines d'écoles et formant autant d'équipes d'éducateurs et d'éducatrices. Aujourd'hui, un siècle plus tard, le succès ne s'est pas démenti : on compte 22 000 écoles affichant le « label Montessori » dans le monde. Pour les fédérer, il existe une Association Montessori Internationale dont le siège est situé à Amsterdam aux Pays-Bas (<https://ami-global.org/>), pays où elle est décédée en 1952. Avant la généralisation de l'euro sur une partie de l'Europe en 2002, le billet de 1 000 liras, en Italie, était à l'effigie de Maria Montessori... à l'effigie de la pédagogie !

Le message de Montessori trouve un écho puissant dans les sociétés actuelles où le respect de l'enfant, l'autonomie, le bien-être, la

bienveillance et l'éducation multisensorielle sont des valeurs importantes. De surcroît, beaucoup de recherches en sciences cognitives et neurosciences viennent conforter ses intuitions et observations très lucides des enfants.

On sait aussi que des personnalités célèbres du monde contemporain, comme les fondateurs de Google, Sergey Brin et Larry Page, ont été élèves d'une école Montessori et disent y avoir découvert leur créativité. Mais, outre ces cas positifs exceptionnels, des réserves sont parfois émises, comme par l'ancien ministre de l'Éducation français, Xavier Darcos, dans son *Dictionnaire amoureux de l'école* (2016) : « [...] Je reste sceptique car bien des témoignages montrent que les enfants qui quittent le monde montessorien pour continuer leurs études et pour affronter le monde sont désemparés et ont du mal à suivre le rythme d'un groupe. » (p. 408) Cela nous rappelle que le projet de Montessori comportait, comme celui de ses illustres prédécesseurs philosophes, médecins et pédagogues, une bonne part d'utopie. Mais cette utopie a créé un mouvement qui, lui, est bien réel.

Autre indicateur, s'il en fallait encore, du succès « grand public » actuel de la pédagogie Montessori : au moment où j'écris ces lignes paraît chez Hachette un album pour enfants, au graphisme contemporain très beau et épuré, *Noé à l'école Montessori* (Surugue & Soucail, 2017). C'est le premier album en français qui prépare petits et grands à entrer dans une école Montessori. En le parcourant avec ses parents durant les vacances, l'enfant peut accompagner Noé tout au long de sa journée et découvrir l'ambiance (la classe), l'éducatrice (la maîtresse), les activités, le matériel pédagogique, la sieste, et tout ce qui fait l'esprit et la spécificité d'une école Montessori. L'une des auteures, Karine Surugue, est éducatrice Montessori, formée à l'Institut supérieur Maria Montessori en France, affilié à l'Association Montessori Internationale citée plus haut. La seule lecture de cet album enfantin, intéressante même pour un adulte, suffit à se plonger concrètement dans le quotidien d'une école Montessori en ce début de XXI^e siècle.

Montessori fonda ainsi l'éducation nouvelle par des méthodes pratiques centrées sur le respect de la personnalité et des besoins de l'enfant de 0 à 6 ans, période fondatrice de son avenir, et dont

l'objectif final était – on l'oublie parfois – de « servir la paix » de l'humanité *via* des adultes épanouis (Montessori, 1914). Ses méthodes reposaient sur un matériel concret destiné à créer un environnement favorable à l'élan vital des enfants : des cartes d'éveil sensoriel et cognitif pour les bébés, la découverte de l'alphabet par le toucher à travers 26 lettres et 14 graphèmes (12 digrammes et 2 trigrammes) rugueux qui aident les enfants à apprendre à lire et à écrire dès la maternelle (en associant lettres, sons et gestes), de même pour les chiffres ; il y a aussi, pour la maison ou l'école, des jeux d'identification de formes géométriques, d'habileté manuelle, d'observation et de logique, qui tous éveillent la curiosité et l'imagination.

En 1936, dans *L'enfant*, Montessori écrivait, à propos des périodes sensibles du développement : « [...] le mécanisme des différents organes intérieurs est indubitablement admirable dans le fonctionnement du corps, mais personne ne le voit, personne ne le remarque. » (p. 41) Sans encore imaginer la découverte future de l'imagerie cérébrale un demi-siècle plus tard, Montessori, médecin, soulignait que « la découverte des organes intérieurs est très récente [au regard de l'histoire des sciences, citant les premières dissections anatomiques du corps humain à la Renaissance et la découverte de la circulation sanguine au XVII^e siècle] » et d'ajouter : « Quel étonnement que, seules, les maladies psychiques aient été étudiées chez l'enfant et qu'on ait laissé dans la plus profonde obscurité le fonctionnement normal de son âme ! » (p. 42) Dit autrement, en termes plus contemporains et neurocognitifs, il ne faut pas seulement s'intéresser au cerveau de l'enfant quand il est malade, mais aussi quand il est normal, qu'il va bien, mais doit encore se déployer et apprendre ; un vrai défi !

C'est par ce passage, cette généralisation, du « pathologique » (déficients mentaux) au normal que l'œuvre de Montessori a pris toute son ampleur, toute sa singularité par rapport à Itard ou Séguin. De Victor de l'Aveyron, on est passé à tous les enfants du monde !

Dans *L'enfant*, toujours, à propos des périodes sensibles du développement, Montessori décrit avec une remarquable acuité psychologique (affûtée du regard de la femme médecin) ce que l'on

pourrait appeler les embrasements cognitifs de l'enfant, en rapport avec sa sensibilité exceptionnelle en réaction à un obstacle (parfois qualifiée négativement de caprice par les parents ou les professeurs des écoles) : « On sait que c'est le propre de l'enfant d'avoir ces élévations impressionnantes de température pour des petites maladies qui laisseraient l'adulte à l'état quasi normal : une espèce de fièvre fantastique qui disparaît aussi facilement qu'elle est venue. Eh bien, il peut, sur le plan psychique, se produire des agitations aussi violentes pour des causes infimes, en rapport avec la sensibilité exceptionnelle de l'enfant. » (p. 40) Cette sensibilité exacerbée est ici le corrélat de « fenêtres de lucidité » et d'apprentissage.

Aujourd'hui, de façon comparable, la psychologue du développement Alison Gopnik (2012) suggère que les bébés et les enfants sont en fait plus conscients, plus « ouverts au monde » (fenêtres de lucidité), que nous en tant qu'adultes ! En outre, le concept de périodes critiques ou sensibles du développement (quand le « ciment » est encore souple), introduit par Montessori, est confirmé par des études expérimentales actuelles à propos de la perception de la parole, par exemple Werker & Hensch (2015).

Dans un chapitre du même livre sur l'intelligence, son intuition et ses observations de l'époque lui font découvrir des fondamentaux de la psychologie contemporaine du développement cognitif, après Piaget ! Outre la non-linéarité du développement (la dynamique des embrasements cognitifs et sensoriels) qui vient d'être évoquée, révélant un enfant parfois plus lucide que l'adulte sur certaines choses ou certains détails, elle comprend que « l'intelligence ne se construit pas lentement..., comme le concevait la psychologie mécanique » (p. 56), mais qu'il y a des bouffées, des fulgurances, et, qu'à propos du raisonnement, « ... c'est dans cette voie [la raison] que le bébé avancera, bien avant que ses petits pieds commencent à cheminer dans celle où évoluera son corps » (p. 58). Dit autrement, la cognition, même le raisonnement – on le sait aujourd'hui, logique, statistique –, précèdent la marche (au stade que Piaget appellera simplement « sensorimoteur », de 0 à 2 ans). L'analyse est d'une clairvoyante modernité sur les compétences cognitives précoces du bébé récemment confirmées (voir Houdé, 2014, *Le Raisonnement*, chapitre

IV : Le paradoxe du raisonnement chez le bébé). Enfin, elle décrit comment le bébé, à travers un regard préoccupé, puis rapide, puis plus long, découvre ses premières erreurs, par conscience réflexive, source de progrès : « [...] Il venait de découvrir sa première erreur. Pour la première fois, à quatre semaines, l'inanité de la raison humaine s'était présentée à son esprit. » (p. 59)

Dans un ultime chapitre de *L'enfant* sur l'intelligence de l'amour (non pas au sens affectif commun mais au sens, plus perceptif et cognitif, d'une poussée irrésistible de l'enfant vers les choses lors des périodes sensibles), elle souligne l'immense responsabilité des adultes, des éducateurs – donc de l'école et de l'Éducation nationale – car : « L'adulte grave dans la mémoire de l'enfant, absolument comme un burin incise dans la pierre. Aussi l'adulte devrait-il mesurer les mots qu'il dit devant l'enfant, parce que celui-ci est avide de saisir ; c'est un véritable accumulateur. » (p. 205) Montessori percevait « cette possibilité qu'à l'enfant d'observer avec une telle minutie, une telle véhémence tout ce qui l'entoure, et d'y découvrir ce qui nous échappe, à nous, qui sommes déjà éteints ! » (p. 201)

Ici encore, la pédagogue italienne ouvre la voie à Gopnik qui, dans sa conférence TED (*Technology, Entertainment and Design*) en 2011, suggère qu'en sciences cognitives, « au lieu de voir les bébés et les enfants comme des adultes défectueux, nous devrions les percevoir comme des individus à un stade de développement différent, d'une même espèce – comme les chenilles et les papillons – excepté qu'ils sont en fait de brillants papillons qui virevoltent dans le jardin et explorent. Et nous sommes les chenilles qui avancent tout doucement le long de notre étroit chemin d'adultes »⁴.

Pour achever ce portrait, dans son écho le plus concret et pratique à destination du grand public, tel que chacun peut le découvrir en librairie aux rayons enfants, éducation et pédagogie, je donnerai pour exemple de l'engouement Montessori actuel, parmi une floraison d'autres, un superbe coffret paru en 2017 chez Larousse, intitulé *Mon grand coffret Montessori d'initiation à la lecture* avec 120 cartes de nomenclature (classification), 26 lettres et 14 graphèmes rugueux, un guide d'explication extrêmement clair qui donne envie d'apprendre à lire aux enfants, rien qu'à le consulter. Il ne s'agit pas ici d'en faire la

publicité mais de remarquer : quel pédagogue ne rêverait-il pas d'une telle postérité ? C'est un peu dans ces cartes d'éveil doucement rugueuses et colorées, ou d'autres matériels Montessori dans le monde, l'héritage de Locke, Rousseau, Itard et Séguin que l'on retrouve !

À la même époque que Montessori naquit en France Célestin Freinet (1896-1966). Après des études à l'École normale de Nice (grièvement blessé en 1915 à l'offensive du Chemin des Dames, médaille militaire et Légion d'honneur), il devint instituteur en 1920 dans l'arrière-pays niçois à Bar-sur-Loup, puis à Saint-Paul-de-Vence et, dans les années trente, à Vence, où il créa sa propre « école Freinet » (la première, encore privée) avec son épouse Élise.



Portrait du pédagogue français Célestin Freinet (1896-1966).

Au sortir de la Grande Guerre, l'esprit de ce Provençal était pacifiste comme Montessori, convaincu que l'éducation nouvelle était la clé de l'émancipation politique et citoyenne qui permettrait de créer un nouvel humain. Il participa dès 1923 à un congrès de l'éducation nouvelle et se lia notamment au Belge Ovide Decroly. Il était par ailleurs combattant politique par son engagement syndical, d'esprit

socio-communiste, populaire, révolutionnaire, ce qui lui fut reproché. À cet égard, insoumis, intransigeant, il mena une vie qui ne fut qu'une succession de projets et de conflits, dont le détail importe peu ici, mais qui ont toujours eu pour moteur ses idées premières : apprendre aux enfants les notions essentielles (français, mathématiques, sciences, etc.) par le tâtonnement expérimental dans des situations réelles de « travail imité », enracinées dans la vie du milieu rural, tels le jardinage, l'élevage de petits animaux, la menuiserie, la maçonnerie, la poterie, la peinture, etc., pour les préparer à leur vie d'adultes responsables (en principe, il peut aussi s'agir d'un milieu urbain). Ce qui comptait pour Freinet, c'était le « bain de la vie », de l'action, l'apprentissage par la pratique et le projet concret, contre l'idée illusoire, mais commune, de l'éducation classique formelle et verbale (« C'est en forgeant qu'on devient forgeron », rappelait-il).

C'est ainsi dans le travail créateur que Freinet voyait le meilleur creuset, à la fois individuel et collectif, de sa pédagogie scolaire : en salle commune ou en ateliers spécialisés (sa classe était une véritable « petite ruche »), toujours avec un plan individuel de travail pour chaque élève, c'est-à-dire des objectifs et des tâches à accomplir. Il était aussi attaché à la libre expression des enfants en lien avec l'imprimerie (technique du texte libre, individuel ou collectif, et journal scolaire hebdomadaire avec trois colonnes : critiques, félicitations, demandes) pour communiquer leurs émotions, sentiments, désirs, réflexions et questionnements dans un esprit démocratique.

Il reprit de Montessori l'importance du cadre de vie pédagogique, de techniques appropriées, sans systématisme toutefois, et d'une attention constante portée aux intérêts des enfants : leur élan vital (on retrouve Locke, « cette force enfantine qui fuse dans l'action »). La dimension sociale, collective, était aussi centrale chez Freinet – plus peut-être que chez Montessori – tant pour les enfants (correspondance interscolaire dans des jumelages entre classes, travail de groupe autour de l'atelier d'imprimerie, etc.) que pour les enseignants dans la coopération scolaire : création de la Coopérative de l'enseignement laïc, du Fichier coopératif scolaire et de la Bibliothèque de travail

(avec les contributions des enfants) dans les années 1920-1930. Autant d'outils destinés à partager les techniques dites « Freinet », les expériences et surtout le tâtonnement expérimental qui devait être celui des instituteurs comme des enfants !

Fait remarquable dans la vie du « maître insurgé » : après une période de difficultés que Freinet connut avec l'institution publique dont il fut évincé, Jean Zay, arrivé en 1936 au ministère de l'Éducation nationale dans le Gouvernement de Léon Blum, l'autorisa à ouvrir une école privée à Vence où il put expérimenter ses idées. Décédé en 1966, il a notamment laissé ses *Œuvres pédagogiques* (1942-1943, rééditées en 1994) ; voir aussi *Le maître insurgé : articles éditoriaux 1920-1939* (réunis et réédités en 2016).

Célestin Freinet connut très tôt une grande notoriété, notamment grâce au film *L'École buissonnière* de Jean-Paul Le Chanois (1949) qui racontait sa vie romancée. Aujourd'hui, la pédagogie Freinet se perpétue via le Mouvement de l'École moderne et la pédagogie coopérative (voir Peyronie, 1999) ; dans l'esprit même de Freinet, ses techniques se renouvellent : l'ordinateur et les tablettes complètent désormais (parfois remplacent) l'imprimerie. Enfin est arrivée la consécration : l'école Freinet de Vence, devenue publique en 1991 (par décision de Lionel Jospin, alors ministre de l'Éducation nationale), est désormais classée au patrimoine de l'Unesco.

Resté marginal en France, Freinet a toutefois contribué à ce que ses idées et celles de l'éducation nouvelle soient intégrées peu à peu dans les instructions officielles de l'Éducation nationale : réorienter l'école vers l'enfant et ses centres d'intérêt pour le rendre acteur de ses apprentissages et contribuer à son émancipation. Aujourd'hui, beaucoup de militants des « idées Freinet » travaillent dans l'école publique ; d'autres ont créé des écoles privées.

À la même époque que Montessori, Freinet concevait donc des méthodes nouvelles d'éducation populaire basées, par exemple, sur l'expression libre des enfants par des ateliers d'imprimerie à l'école, ainsi que sur le tâtonnement expérimental par essais et erreurs – lui aussi croyait à l'élan vital des enfants, mais structuré par le travail cognitif plutôt que par le jeu. Ici encore, sans imaginer la future

révolution numérique (les tablettes en classe), Freinet introduisit non seulement l'imprimerie pour correspondre à distance entre élèves, mais également le cinéma et la radio à l'école – nouvelles technologies de l'époque – dans le but (i) d'un épanouissement des personnalités, d'une coopération sociale des élèves dans l'action (chacun ayant son rôle indispensable lors de l'atelier d'imprimerie, de menuiserie, de jardinage, de comptabilité de l'école, etc.) et dans le but conjoint, par ce prisme pratique, (ii) « d'une occasion scolaire d'acquérir, d'amplifier et de préciser les diverses acquisitions : langue, grammaire, vocabulaire, science, histoire, géographie, morale, en greffant logiquement sur l'intérêt enfantin ainsi extériorisé des disciplines prévues au programme » (1929, in *Textes choisis*, 1999, p. 75).

Se posait évidemment la question du contrôle des connaissances. Freinet l'a remarquablement pensée par le biais de fiches dites « autocorrectives », qui préfiguraient l'enseignement programmé de Skinner, où sont comparés le plan individuel de travail, sorte de contrat d'objectifs, et les actions effectivement exécutées par l'élève. Freinet exerçait ainsi la métacognition des enfants. Cette autoévaluation était complétée par une note appréciative sur trois critères (discipline, propreté et vie communautaire) ainsi que par la délivrance de brevets pour les travaux pratiques. Tout concourrait à *faire pour apprendre !*

Dans l'enseignement magistral, vertical, collectif, classique, on a tout simplement oublié, aujourd'hui encore, pour des raisons d'organisation de l'école, ou faute de s'intéresser à la psychologie et au cerveau des enfants (à leur « âme », leur élan), qu'un organisme passif n'apprend pas, ou mal. Piaget, Montessori et Freinet n'ont pourtant eu de cesse, au xx^e siècle, que de rappeler le besoin d'une pédagogie fondée sur l'action, la pratique, les essais-erreurs et le projet.

De mon expérience concrète d'une classe Freinet à Louvain-la-Neuve en Belgique en 1983, je garde comme souvenir le plus fort, le cercle que nous formions chaque matin avec les enfants pour commencer la journée, assis par terre. L'expression y était tout à fait libre, l'un racontant une activité ou un événement du week-end, de la

veille, du matin même, l'autre un rêve de la nuit, etc. Autant d'éléments spontanés, d'intérêts des enfants que nous déclinions ensuite selon les activités et ateliers individuels et collectifs prévus pour la journée, telle l'imprimerie, ou qui pouvaient conduire à un projet pour les jours suivants, telle une promenade en forêt, avec des notions de français, de mathématiques (cartes, espace, distances), de sciences (botanique, physique) et l'exercice de la mémoire, du raisonnement (tâtonnement expérimental), de la planification, de la communication sociale, etc. Ce processus de libre expression et d'intérêts des enfants, non pour faire leurs caprices, mais pour les motiver, avait un effet réellement magique dont je peux témoigner en comparaison avec l'expérience d'autres classes de pédagogie traditionnelle, unidirectionnelle (du professeur vers l'élève) que j'ai connues. Comme le remarquait Freinet, l'enfant qui participe à une activité qui le passionne se discipline automatiquement (s'autodiscipline). Il donne de surcroît – tel un chercheur – le meilleur de lui-même, de son élan, de sa curiosité, pour découvrir et apprendre. Dans une classe Freinet, se laissant porté, le jour, par l'élan vital des enfants – force inouïe – le professeur a dès lors pour travail pédagogique imaginatif, formel, de reconstruire les choses, de les penser le soir, au cours de la semaine ou d'une semaine à l'autre, de manière à ce que les éléments du programme soient bien abordés par tous les enfants selon le plan de travail de chacun.

Parmi les acteurs de l'éducation nouvelle, outre Montessori en Italie et Freinet en France, il y eut aussi Ovide Decroly (1871-1932) en Belgique. Après des études de médecine, ce neurologue se passionna pour l'éducation des enfants en grande difficulté (dits « anormaux », « arriérés »), qu'il appelait simplement « irréguliers ». Il les accueillit même chez lui, à son domicile. Un peu comme Montessori, il mit au point diverses méthodes adaptées à ces enfants fragiles et démunis, qu'il généralisa ensuite à tous les élèves de son école L'Ermitage à Bruxelles. Il est l'un des cofondateurs du courant de l'éducation nouvelle et, à ce titre, il centrait son approche, comme Montessori et Freinet, sur l'intérêt spontané et l'activité de l'enfant.

Sa formation de médecin le rendait très soucieux du bien-être des enfants et de leur santé physique qui conditionnaient, selon lui, tout

épanouissement et tout apprentissage. Pour cela, il recommandait la vie en plein air et la gymnastique. En outre, la nature au sens large d'une « globalisation de l'école » (la rue, la cité, une cuisine, un jardin, etc.) offrait, selon Decroly, la possibilité d'éveiller la curiosité cognitive des enfants, d'où l'observation, l'expérimentation, le contact direct avec les choses (Rousseau) et la construction manuelle (Decroly, 1908, réédition 2009 ; voir aussi Decroly, 1929). Autant d'activités et de processus psychologiques qui installaient très naturellement, au gré des intérêts enfantins, la géographie, les sciences naturelles et l'histoire. Le besoin de consigner et de communiquer les informations ainsi recueillies et découvertes par l'expérimentation provoquait la lecture, les dessins et les schémas ! On retrouvait dès lors, naturellement, tous les éléments de la pédagogie scolaire et des apprentissages fondamentaux. La démarche rejoint ici celles de Montessori et de Freinet.

Decroly, bon psychologue, était aussi très attentif à la sécurité affective des enfants. Comme Montessori, il préconisait le jeu, qui sécurisait les enfants, ainsi que le principe d'un style pédagogique où les tâches proposées n'excédaient jamais les possibilités de l'enfant. La sécurité affective était également assurée, dans l'école L'Ermitage, par la confiance faite aux enfants *via* des responsabilités qui leur étaient confiées au sein du groupe. C'était, résolument, l'éducation précoce à l'autonomie, encouragée par tous les tenants de l'école nouvelle.

Enfin, concernant l'apprentissage de la lecture évoqué plus haut, Decroly conçut une méthode dite « globale », au sens où les mots, dans leur graphie globale, étaient des sortes de « bonnes formes » (telles que les définissait alors, en psychologie, la théorie de la *Gestalt* en Allemagne). Selon lui, c'étaient ces dessins distincts et prégnants (les bonnes formes des mots) qui s'imposaient à l'œil dans la nature, entendue ici comme l'environnement culturel. Il fallait donc partir d'eux et non des lettres ou des syllabes (méthode classique, dite « syllabique ») pour apprendre à lire. Cela toujours dans le souci qu'avait Decroly du contact direct et naturel de l'enfant avec les choses, ici les mots et les objets ou situations qui y correspondaient.

Freinet aussi, inspiré par Decroly, préconisa de partir du mot dans son entier, et surtout du sens de l'écrit, pour apprendre à lire. Cette

méthode globale de lecture, également appelée « idéovisuelle », s'opposant au classique b.a. ba (découpage sans sens), a été systématisée par des pédagogues zéloteurs du « tout global » dans les années quatre-vingts tels Jean Foucambert en France (à l'Institut National de Recherche Pédagogique, INRP), suggérant d'utiliser directement des mots entiers simples et familiers, voire des phrases entières, pour apprendre à lire aux enfants sous la forme de jeux de devinette, en lien avec des images et le contexte. On verra que cette méthode globale est aujourd'hui proscrite par les neurosciences cognitives de la lecture, au profit de méthodes syllabiques phonémiques plus classiques et (ou) mixtes.

Au début du xx^e siècle, le courant de l'éducation nouvelle a ainsi réuni des médecins, des psychologues et pédagogues (Montessori, Freinet, Decroly et bien d'autres) au service d'une « psychopédagogie » des enfants d'âges préscolaire et scolaire. À la même époque, Alfred Binet en France (1857-1911) s'était aussi intéressé, avant Piaget, à la psychologie scolaire par le biais des différences interindividuelles d'intelligence et d'attention chez les enfants, aux sources du QI.

Alfred Binet, Jean Piaget et Lev Vygotski : les psychologues de l'enfant

À la fin du XIX^e siècle, dans le sillage de la physiologie allemande, notamment celle d'Hermann Helmholtz, spécialiste de la vitesse de conduction de l'influx nerveux et de la perception auditive et chromatique, Gustav Fechner et Wilhelm Wundt ont été à l'origine de la création, à Leipzig en 1875, du tout premier laboratoire de psychologie expérimentale au monde. Des jeunes psychologues expérimentalistes de nombreux pays (en particulier des États-Unis) sont alors venus s'y former.

Dans cette dynamique, en 1891, le fondateur de la psychologie scientifique américaine, William James, créa le premier laboratoire de psychologie à Harvard. En France, c'est Théodule Ribot, auteur de *La psychologie allemande contemporaine* (1879) et titulaire de la première Chaire de psychologie au Collège de France, intitulée « Psychologie expérimentale et comparée » (1888-1896), qui encouragea cette nouvelle logique scientifique. Sous son impulsion et grâce au soutien de Louis Liard, directeur de l'Enseignement supérieur, fut créé le premier laboratoire français de psychologie expérimentale à la Sorbonne⁵, d'abord dirigé par Henri Beaunis de 1889 à 1894, puis par Alfred Binet de 1895 à 1911.

Binet, héritier de ce laboratoire équipé des instruments de mesure les plus modernes (avec un « outillage délicat » et une « installation spéciale », disait-il), comme ceux de Wundt en Allemagne, put y mener des recherches sur les temps de réaction, combinant psychométrie et psychophysique.

Mais la renommée internationale de Binet est venue un peu plus tard, par une autre voie. Le contexte de l'école primaire républicaine, gratuite et obligatoire, qu'avait promue le ministre Jules Ferry (1832-1893), créa une attente nouvelle forte à l'égard des psychologues : pouvaient-ils dépister assez tôt les enfants présentant des difficultés liées à un handicap intellectuel afin de créer pour eux des classes expérimentales adaptées ? C'est dans cet objectif – à la

demande expresse du Gouvernement français – qu'en 1905 Binet élaborait, avec Théodore Simon, le premier test d'âge mental : une échelle métrique d'intelligence, dite « test Binet-Simon »⁶. Il était le point de départ de l'invention, quelques années plus tard, du quotient intellectuel (QI) par le psychologue allemand William Stern (1871-1938) selon la formule : $QI = \text{âge mental} / \text{âge réel} \times 100$. Dans ce calcul emblématique de la psychométrie, l'intelligence normale se situe autour de 100 (plus ou moins 15 ou 30 selon le critère). Ce calcul précis – mesure de différences de potentiel intellectuel entre les enfants – rejoignait, à la même époque, les préoccupations différentialistes issues de la psychologie statistique anglaise (Pearson, Fischer, Spearman) née sous l'impulsion initiale de Francis Galton, lui-même inspiré, au XIX^e siècle, de son célèbre cousin, le biologiste, Charles Darwin (1809-1882)⁷.

La question du QI est certes importante⁸, mais je voudrais ici mettre en exergue une étude expérimentale de Binet, antérieure à la publication de son échelle métrique, moins connue et particulièrement intéressante pour la suite des études en sciences cognitives chez les enfants d'âge scolaire.

En 1900, Binet publia dans *L'Année psychologique* (revue qu'il avait fondée en 1894) une étude de plus de 150 pages, intitulée « Attention et adaptation », menée auprès d'un échantillon d'élèves (âge moyen, 10-11 ans) d'une école primaire de Paris. Il s'agissait déjà, pour lui, de comprendre les différences d'intelligence entre ces enfants. Dans cet article, Binet raconte comment, à sa demande, le professeur de la classe, en concertation avec le directeur de l'école, s'était efforcé de désigner un sous-groupe d'élèves « les plus intelligents » et un autre, « les moins intelligents ». Il a alors, dans ses observations minutieuses, sans cesse comparé ces deux groupes l'un à l'autre, cherchant pour diverses tâches d'attention volontaire dans quelle mesure elles permettaient de les distinguer. La logique de Binet était que, lorsque les résultats des enfants étaient équivalents, il rejetait la tâche comme mauvaise pour sa recherche. En revanche, lorsque le groupe d'élèves dits « les plus intelligents » obtenait de meilleurs résultats, il la conservait.

Mais Binet (p. 374 de la revue et suivantes) rapporte un résultat

contraire à sa logique, où les intelligents étaient moins bons, ce qui était intrigant pour lui. Ainsi, dans une tâche d'attention sélective qu'il appelait « correction d'épreuves » au sens éditorial (proche des tests de barrage utilisés aujourd'hui en psychologie cognitive), il donnait aux élèves une feuille imprimée où ils devaient barrer certaines lettres, les cibles (et pas les autres, les distracteurs) à chaque fois qu'ils les rencontraient dans leur lecture. Par exemple tous les a, e, d, r et s, écrits en marge à gauche, devaient être barrés dans le texte. Les erreurs des élèves étaient soit des omissions de lettres cibles (un a oublié par exemple), soit des intrusions de lettres distracteurs (tel le barrage erroné d'un i). Dans cette première tâche, les élèves intelligents étaient nettement meilleurs que les autres. Binet eut alors la bonne idée, quand la tâche fut terminée et les copies ramassées, d'annoncer aux élèves qu'ils avaient à faire un nouvel exercice, analogue au précédent, mais consistant à barrer d'autres lettres : i, o, l, f, t. Dans cette nouvelle expérience, son but était « de rechercher avec quelle facilité un élève, après avoir créé dans son esprit certaines associations, peut [les] abandonner [...] et les remplacer par d'autres. Cette étude sur l'inhibition des associations d'idées a déjà été faite [notait-il] par un psychologue américain, Bergström⁹ » (p. 374).

Au regard des résultats, Binet note (toujours p. 374) que « comme on devait s'y attendre, le travail s'est beaucoup ralenti ; la nécessité d'abandonner une habitude et de la remplacer rapidement par une autre habitude a créé de sérieuses difficultés, et quelques élèves s'en sont même plaints à haute voix ; la quantité de travail a diminué en général de plus de la moitié. Cette diminution est la même pour les deux groupes d'élèves ». Plus loin il ajoute : « Fait bien surprenant, à première vue, ce sont les intelligents qui ont commis le plus d'erreurs !... C'est presque une différence de moitié. Cette différence est vraiment trop grande pour qu'on puisse la mettre sur le compte du hasard. » (p. 375)

Outre l'observation du coût exécutif du changement de tâche pour les deux groupes d'élèves (le travail ralenti), sans le savoir, Binet effleurait ici un effet expérimental important et bien connu aujourd'hui en psychologie cognitive, dont nous reparlerons : « l'amorçage négatif » (*negative priming* en anglais). C'est l'indicateur

d'une inhibition efficace car, très vraisemblablement, ce qui s'est passé est que les élèves dits « intelligents » de Binet, ayant très bien réussi la première tâche, mieux que les dits « inintelligents », ont inhibé plus efficacement et précisément qu'eux les distracteurs lors de cette tâche initiale, c'est-à-dire toutes les lettres qui n'étaient pas des a, e, d, r et s, donc, en particulier, les cibles de la tâche suivante (i, o, l, f, t). Dans cette dernière, la levée d'inhibition était, par conséquent, plus « coûteuse » pour le groupe des « intelligents », ce qui s'est traduit par un plus grand nombre d'erreurs (amorçage négatif). Le résultat, intrigant pour Binet, était en fait très logique.

Ainsi, Binet, qui était fin psychologue, a touché du doigt dans cette étude sur l'attention et l'adaptation, le lien intime entre l'intelligence et l'inhibition. Comme le remarquent Boujon et Lemoine (2002), dans un livre intitulé *L'inhibition, au carrefour des neurosciences et des sciences de la cognition*, depuis ce relevé anecdotique de Binet en 1900, il fallut attendre nos propres recherches en psychologie du développement cognitif de l'enfant (Houdé, 1995, 2000)¹⁰, dans le même laboratoire un siècle plus tard, pour remettre à l'ordre du jour cette question, devenue centrale, de l'inhibition efficace.

Entre-temps, la théorie de Piaget – qui n'a pas identifié ce processus d'inhibition cognitive – s'est imposée et a dominé tout le champ de la psychologie du développement au xx^e siècle en Europe et dans le monde.

En 1896 naquit Jean Piaget à Neuchâtel, ville où son père était professeur de langues et de littérature romanes.



Portrait du psychologue suisse Jean Piaget (1896-1980).

Très précocement, le jeune Jean Piaget montra un goût prononcé pour l'histoire naturelle. À 11 ans, il publia dans une revue régionale, *Le Rameau de sapin*, ses observations d'un moineau albinos, ce qui lui valut d'être admis au Muséum d'histoire naturelle de Neuchâtel pour classer et étudier les collections de fossiles, d'oiseaux et de coquillages. À 16 ans, en 1912, il publia dans le très sérieux *Journal de Conchyliologie* son premier article sur « Les limnées des lacs de Neuchâtel, Bienne, Murat et les environs » où il donnait une classification des variétés multiples de ces petits mollusques des eaux douces et salées. Suit une quinzaine d'articles entre 1912 et 1914 où, avec une maturité intellectuelle exceptionnelle, il conjugua les conceptions évolutionnistes, transformistes, de Lamarck et le mécanisme de sélection naturelle de Darwin, pour expliquer les variations observées.

En 1918, Piaget soutint un doctorat de sciences naturelles en malacologie (partie de la zoologie qui traite des mollusques). Mais, préoccupé tout autant de l'évolution des formes de l'intelligence que

de celle des formes biologiques (avec l'objectif de dépasser l'opposition bergsonienne de l'intelligence et du vital exposée dans *L'évolution créatrice*, 1907), il se rendit tout d'abord, la même année 1918, à Zurich pour suivre une formation en psychologie expérimentale, puis à Paris, de 1919 à 1921, où il suivit un triple enseignement : psychologie, logique et histoire des sciences. Il y rencontra les philosophes, psychiatres et psychologues célèbres de l'époque. Dans cet environnement intellectuel qui convenait à ses préoccupations scientifiques, il entrevit déjà ce qui sera son champ de recherche : construire une théorie de l'instrument même de la connaissance en étudiant, à travers l'ontogenèse des conduites, les formes successives d'élaboration de la logique. Il en commença d'ailleurs l'approche pratique, introduit par Théodore Simon, au laboratoire de pédagogie expérimentale qu'avait créé Binet en 1905 dans l'école de la rue de la Grange-aux-Belles à Paris (laboratoire pédagogique jumelé à celui de la Sorbonne). Piaget y étudia, à propos de la notion de partie, les niveaux de la logique des classes chez l'enfant. C'est là que, rompant déjà avec la méthode des tests de Binet et Simon, il élaborait sa propre méthode d'interrogation clinique qui lui révéla l'originalité de la pensée enfantine.

De retour à Genève, Piaget devint le collaborateur d'Édouard Claparède (qui était lui-même en relation avec Freinet et le mouvement de l'éducation nouvelle) à l'Institut Jean-Jacques Rousseau. Marié en 1933, la naissance de ses trois enfants fut le point de départ d'observations minutieuses des deux premières années de la vie, qui constituèrent la matière de trois ouvrages célèbres : *La naissance de l'intelligence chez l'enfant* (1936), *La construction du réel chez l'enfant* (1937) et *La formation du symbole chez l'enfant* (1945).

Parallèlement à ses travaux de recherche, la carrière universitaire de Piaget se poursuivit à Neuchâtel, Lausanne et surtout Genève, où il enseigna la psychologie génétique (au sens d'ontogenèse) et l'histoire de la pensée scientifique. En 1942, il donna à Paris, au Collège de France, une série de conférences qui deviendront *La psychologie de l'intelligence* (1947, nouvelle édition 2012) et, de 1952 à 1963, il occupa, à la Sorbonne, la Chaire de psychologie de l'enfant.

La grande époque des recherches piagétienne a commencé un

peu avant 1940, avec une équipe de collaborateurs remarquables : Bärbel Inhelder qui occupa une place particulière en raison du nombre et de l'importance des ouvrages écrits avec Piaget, Alina Szeminska, Pierre Gréco, Jean-Blaise Grize (le logicien de Piaget), etc. Deux séries de travaux furent conduites : (i) l'examen méthodique des différentes notions ou normes logiques et des domaines où elles se développent (nombre, classe, espace, temps, vitesse, etc.) ; (ii) l'élaboration de modèles formels qui rendent compte précisément de la genèse de ces invariants. Des ouvrages fondamentaux rapportant ces travaux, nous n'en citerons ici que deux, qui suscitèrent un nombre impressionnant de recherches : *La genèse du nombre chez l'enfant* (Piaget & Szeminska, 1941) et *Genèse des structures logiques élémentaires* (Inhelder & Piaget, 1959).

En 1955, Piaget fonda à Genève le Centre International d'Épistémologie Génétique (CIEG), lieu inégalé de rencontres et d'échanges pour les psychologues, les logiciens, les biologistes, les mathématiciens, les physiciens et les philosophes du monde entier. C'était déjà les sciences cognitives ! Piaget y alimenta ses réflexions épistémologiques sur l'équilibration des structures, les différents types d'abstraction, le possible et le nécessaire, etc.

Sa production intellectuelle fut extraordinairement féconde. Entre 1907, date du premier écrit, et sa mort en 1980, on compte plus de 700 publications. À celles-ci s'ajoutent trois ouvrages posthumes : *Le possible et le nécessaire* (1981-1983), *Vers une logique des significations* (1987) et *Morphismes et catégories* (1990), qui renouvelaient et prolongeaient sa théorie. Pour des livres complets sur la biographie et le parcours intellectuel de Piaget, voir Ducret (1990) et Vidal (2000). En 2010, les éditions Somogy à Paris et les Archives Jean Piaget à Genève ont co-publié un très beau livre *Bonjour Monsieur Piaget : Images d'une vie* (Ratcliff, 2010). On y découvre année par année, de 1920 à 1975, les photos des très nombreux collaborateurs de Piaget.

Ce qui a été radicalement nouveau, avec Piaget, c'est de considérer l'enfance comme le terrain expérimental de l'épistémologie, au sens des mécanismes généraux de la construction des connaissances (ou cognition), qu'il s'agisse de logique, de mathématiques ou de physique. Avec cette « épistémologie génétique » (Piaget, 1970),

définie en référence à l'idée de genèse (ontogenèse), c'est le regard porté sur l'enfant qui a changé. Il est devenu un « petit savant » qui s'interroge sur le réel, bricole, expérimente et, ainsi, (re)découvre les lois du monde : un « enfant mathématicien » (la construction du nombre), « logicien » (la catégorisation, le raisonnement), etc. Ce qui comptait pour Piaget était l'action de l'enfant, comme chez Montessori et Freinet : l'éveil sensoriel, les gestes et le tâtonnement expérimental.

Étudier l'évolution des comportements de l'enfant revenait dès lors à étudier la science en marche du bébé à l'adulte – « l'embryologie de la raison », selon l'expression de Piaget, c'est-à-dire les mathématiques, la logique, la physique, etc., en développement. C'était une forme d'histoire des sciences (dont l'enfant était l'acteur principal) qui s'opérait en un raccourci saisissant (à peine 20 ans). Cette approche épistémologique de l'enfance explique sans doute pourquoi la théorie de Piaget a séduit – et c'est rare pour un psychologue – bien au-delà de la psychologie elle-même. En ont témoigné, dès le début de sa carrière, ses conversations avec Einstein, mais aussi cet hommage que lui rendait en 1990 l'astrophysicien Hubert Reeves : « Le psychologue suisse Jean Piaget a été l'un des premiers à introduire la dimension historique dans l'étude de l'acquisition des connaissances. Il a reconnu d'emblée que la logique est un processus en devenir, soumis à une évolution. [...] La question posée fait surgir une évidence incontournable : le problème de l'origine de la logique est un problème d'ordre psychologique et biologique. » (Reeves, 1990, p. 49)

Établir un lien direct entre la psychologie et la biologie était, en effet, le rêve de Piaget (biologiste/zoologiste de formation), bien illustré par son « cercle des sciences ». Contre l'idée d'« échelle des sciences » qui remontait à Auguste Comte au ^{xix}^e siècle (le premier échelon correspondant aux mathématiques, le « socle de pur bronze », et le dernier à la psychologie – plus exactement à la sociologie, autre science morale), Piaget a proposé, au milieu du ^{xx}^e siècle, de « tordre l'échelle » en la recourbant sur elle-même comme un serpent qui se mord la queue (voir la figure 1).

Dans le cercle des sciences ainsi constitué, la psychologie est, selon Piaget, d'une part au fondement de la logique, des

mathématiques, de la physique et, d'autre part, ancrée dans la biologie, la (bio)chimie (et dans la physique si l'on achève le cercle). Ce changement radical de point de vue a donné une place inédite à la psychologie de l'enfant, au cœur même du dispositif de la science dite « dure », et a préfiguré, en Europe, le cadre interdisciplinaire actuel des sciences cognitives. C'est ainsi que, dans l'*Encyclopedia of Cognitive Science* publiée en 2003 par le groupe d'édition *Nature*, Piaget figure au rang prestigieux des précurseurs (Nadel, 2003).

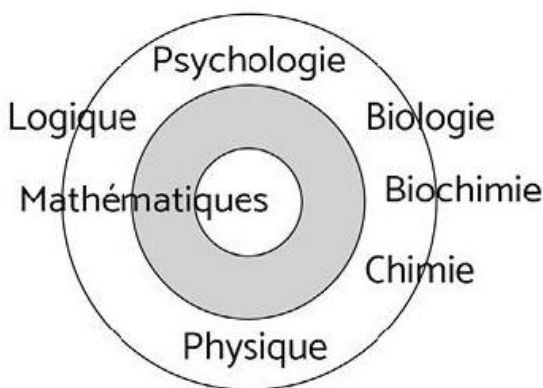


Figure 1 – Le « cercle des sciences » selon Jean Piaget.

Conformément à ce « cercle des sciences », Piaget était donc convaincu de l'ancrage cérébral (biologie) des opérations dites « logico-mathématiques » de l'enfant, de l'adolescent et de l'adulte (psychologie). Il lui manquait toutefois, à l'époque, le moyen technologique de l'observer *in vivo* : l'imagerie cérébrale. Il s'est donc limité, expérimentalement, à inférer les mécanismes psychologiques des opérations logico-mathématiques à partir de l'observation fine des comportements : actions et réponses verbales.

Selon Piaget, le développement de ces comportements – et donc de l'intelligence sous-jacente – passait, de façon incrémentale, par une série de stades. C'est ce que l'on peut appeler le « modèle de l'escalier », chaque marche correspondant à un grand progrès, à un stade bien défini ou un mode (une structure) unique de pensée dans la genèse de l'intelligence logico-mathématique : de (i) l'intelligence sensori-motrice du bébé (0-2 ans) fondée sur ses sens et ses actions, à l'intelligence conceptuelle (nombre, catégorisation, raisonnement),

d'abord (ii) concrète chez l'enfant (vers 7 ans), puis (iii) abstraite et formelle chez l'adolescent (vers 12-14 ans) et l'adulte.

Récusant autant l'empirisme de Locke (ou Hume), pour lequel tout provenait de l'expérience par association et habitude, que l'innéisme (son opposé) qui expliquait tout par des structures innées (Platon, Descartes, mais aussi Kant et ses « formes *a priori* » de la sensibilité), Piaget proposait, pour la première fois, une théorie intermédiaire, dite « constructiviste » : les structures intellectuelles, c'est-à-dire nos pensées, nos opérations mentales, ont une genèse qui leur est propre (l'ontogenèse cognitive). De la naissance à l'âge adulte, elles se construisent progressivement, stade après stade (comme on monte les marches d'un escalier), dans le cadre de l'interaction entre l'individu et son environnement – ou, en termes plus biologiques, entre l'organisme et son milieu. Dans cette interaction, l'essentiel pour Piaget était l'action de l'enfant sur les objets qui l'entouraient (exploration, manipulation et expérimentation), conception opposée à l'idée d'un apprentissage « passif » (association et habitude) propre à l'empirisme. Comme le disait Goethe (1749-1832) dans *Faust* : « Au commencement était l'action ! » Cette idée qui était au cœur de la psychologie piagétienne reste très actuelle. Elle est aujourd'hui défendue en neurosciences cognitives par Alain Berthoz, titulaire honoraire de la Chaire de Physiologie de la perception et de l'action au Collège de France (Berthoz, 1997, 2009, 2013).

Dans l'interaction de l'individu avec son environnement, ce qui comptait pour Piaget, du point de vue fonctionnel, était la dynamique entre l'assimilation et l'accommodation. En psychologie comme en biologie, l'assimilation est le processus par lequel un objet du milieu est « directement appréhendé » par la structure de l'organisme. Inversement, l'accommodation est le processus par lequel la structure de l'organisme se modifie pour s'ajuster au milieu. Piaget voyait dans cette dynamique psychobiologique, qui régissait les actions de l'enfant, le moteur même du développement de l'intelligence par équilibres et autorégulations (internes) successives.

Concernant les stades de ce développement, évoqués plus haut, il distinguait clairement l'intelligence du bébé (0-2 ans) de celle de l'enfant (2-12 ans). Jusqu'à l'âge de 2 ans environ, c'est le stade

sensori-moteur. Le bébé interprète le monde qui l'entoure sur la base de ses sens (l'aspect sensori-) et de ses actions (moteur). Dès la naissance et à partir de ses réflexes initiaux (comme la succion du sein de sa mère), il apprend certaines règles, de plus en plus compliquées au fil des mois, sur le fonctionnement du monde physique et sur sa capacité à agir dessus. Piaget appelait ces règles des « schèmes d'action » (acquis par assimilation/accommodation). Le bébé découvre par exemple, vers 8 mois, que lorsqu'un objet (son nounours par exemple) disparaît de sa vue (caché derrière un coussin sur le canapé), cet objet continue néanmoins d'exister car il peut par ses actions (i) écarter le cache (ici le coussin), et (ii) attraper l'objet pour le ramener à lui. C'est ce qu'on appelle « la permanence de l'objet », principe fondamental de la construction du réel (et ce qui vaut pour nounours vaudra pour tous les objets du monde) (Piaget, 1937). Mais cette forme d'intelligence sensori-motrice (dans notre exemple, vision-action) rend le bébé très dépendant de l'instant présent. C'est déjà de l'intelligence orientée vers un but (retrouver l'objet disparu), donc l'émergence de l'intentionnalité, mais c'est encore une « intelligence en action ». Un autre exemple, éclairant pour Piaget, était celui de l'imitation. Au cours de sa première année, le bébé devient capable d'imiter (action) le geste qu'un adulte est en train de faire (observé par la vision), mais il n'est pas encore capable de le faire de façon différée, c'est-à-dire quelque temps après l'observation du modèle.

En revanche, vers 2 ans – changement de stade (deuxième « marche de l'escalier ») –, l'enfant devient capable de se détacher de l'action immédiate. Selon Piaget, son intelligence est dès lors « symbolique » ou « représentative » (douée de représentation mentale). Il est toutefois difficile de concevoir que la permanence de l'objet n'exigeait pas déjà de la part du bébé une forme élémentaire de représentation mentale (se représenter en mémoire l'objet disparu). Quoi qu'il en soit, c'est à 2 ans qu'émerge le plus clairement l'expression enfantine de la pensée symbolique : l'imitation différée (preuve d'une représentation mentale du modèle absent), le jeu dit « symbolique » (par exemple, l'enfant qui joue au téléphone avec une banane), le dessin et le langage (Piaget, 1945). Ces deux dernières activités symboliques, qui connaissent chez l'Homme une extraordinaire évolution par rapport aux autres animaux (jusqu'à l'art

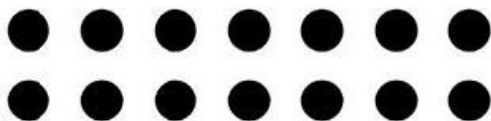
et la littérature), permettent à l'enfant de re-décrire ou de re-présenter des événements vécus. Elles laissent aussi, comme le jeu, libre cours à son imaginaire.

Ainsi, l'enfant de 2 ans se sert des schèmes d'action acquis au stade sensori-moteur, mais cette fois avec une distance par rapport au réel. Il se met à les intérioriser et à les combiner mentalement. Par ce processus cognitif fondamental (intériorisation-combinaison), les actions (réelles) vont progressivement devenir des opérations mentales. C'est le stade de la préparation (2-7 ans) et de la mise en place (7-12 ans) des opérations concrètes, qui correspond à la période essentielle où l'enfant passe de la crèche à l'école maternelle et de celle-ci à l'école élémentaire. À ce stade, l'enfant va construire, selon Piaget, les concepts fondamentaux de sa pensée, tels que le nombre, l'inclusion des classes (catégorisation), etc. (Inhelder & Piaget, 1959 ; Piaget & Szeminska, 1941).

Vers 7 ans – le classique « âge de raison », nouveau stade des opérations concrètes –, son intelligence va, en outre, devenir flexible. C'est ce que Piaget a appelé la « réversibilité opératoire », c'est-à-dire la capacité de l'enfant à annuler, par sa seule pensée, l'effet d'une action (en combinant une opération mentale et son inverse). Voici un exemple relatif au nombre : la tâche piagétienne dite de « conservation des quantités discrètes » (voir la figure 2). Cet exemple est emblématique de la préparation et de la mise en place des opérations concrètes. Sur une table sont disposés deux alignements de jetons (quantités discrètes) de même nombre, 6 à 8 selon les cas, et de même longueur (l'espace occupé sur la table). Vers 4-5 ans, l'enfant d'école maternelle reconnaît qu'il y a le même nombre de jetons dans chaque alignement. Cependant, si l'adulte qui réalise l'expérience écarte les jetons de l'un des deux alignements (le nombre restant identique, alors que la longueur diffère), l'enfant considérera qu'il « y a plus de jetons là où c'est plus long » ! Cette réponse verbale est une erreur d'« intuition perceptive » (longueur = nombre) qui révélait, selon Piaget, que l'enfant dit « préopératoire » n'avait pas encore acquis le concept de nombre (lorsque cette intuition est dite « articulée », elle permet une correspondance terme à terme ou « jeton à jeton »). À partir de 7 ans, en revanche (enfant d'école élémentaire),

sa pensée devient flexible et l'action d'« écarter les jetons » peut être corrigée, annulée, par l'opération inverse, c'est-à-dire par la représentation mentale de l'action de « rapprocher les jetons » – d'où, cette fois, une réponse verbale d'équivalence numérique (« C'est pareil ; les jetons ont changé de place, mais tu peux les remettre comme avant »). Il y a donc, dans ce cas, réversibilité opératoire, conservation des quantités (et ce qui vaut pour les jetons vaut pour tous les objets du monde).

(a) Disposition des jetons avant déplacement



(b) Disposition des jetons après déplacement



Figure 2 – La tâche piagétienne de conservation du nombre.

Disposition des jetons avant (a) et après le déplacement (b) ; on demande à chaque fois à l'enfant s'il y a ou non le même nombre de jetons dans les deux lignes.

D'autres tâches expérimentales ingénieuses comme celle-ci ont été inventées par Piaget. Il a ainsi utilisé, au stade des opérations concrètes, des tâches de conservation (du nombre, de la substance, des liquides, etc.), d'inclusion des classes et de sériation, associées à une méthode originale d'interrogation clinique (inspirée du diagnostic et de l'investigation psychiatriques) : converser librement avec l'enfant à propos de thèmes dirigés (« Y a-t-il plus de jetons quand on les écarte les uns des autres ? », « ... plus de pâte à modeler quand on aplatit la boule ? », « ... plus de marguerites ou plus de fleurs ? ») en testant la solidité de ses réponses verbales par des demandes de justification et des contre-suggestions. L'invention de ces tâches dites « piagésiennes » devait beaucoup à un travail d'équipe (l'École de Genève), notamment à Alina Szeminska et Bärbel Inhelder, citées dans le portrait du maître genevois.

Enfin, au dernier stade de l'intelligence, celui des opérations formelles (de 12 à 16 ans), l'enfant, devenu adolescent, acquiert la capacité de raisonner sur des propositions logiques, des idées, des hypothèses (Inhelder & Piaget, 1955). C'est ce qu'on appelle le « raisonnement hypothético-déductif » chez le scientifique, mais aussi chez tout un chacun lorsque nous raisonnons sous la forme de « Si..., alors... » (par exemple, « Si je n'avais pas acheté ce livre sur la neuropédagogie, alors... », « Si Piaget n'avait pas existé, alors... »). On voit clairement le lien avec l'intelligence du stade précédent, mais ici une véritable « révolution cognitive » s'opère : avant l'adolescence, le possible est un cas particulier du réel, après c'est le réel qui devient un cas particulier du possible ! De stade en stade, on est ainsi passé des schèmes d'action du bébé à la pensée logique et abstraite de l'adolescent.

Cette théorie des stades de l'intelligence, qui a fait la célébrité de Piaget, est très élégante, séduisante et, à première vue, convaincante. Durant la seconde moitié du ^{xx}e siècle, elle a profondément marqué la façon de penser le développement cognitif dans le monde de la psychologie et de l'éducation. Ce sont toutefois ces stades qui font aujourd'hui l'objet des critiques les plus fondées de Piaget en sciences cognitives.

Chez Piaget, on l'a bien perçu, le développement était surtout un mécanisme logique interne à l'enfant (actions, opérations mentales), se déployant stade après stade, où le rôle de l'environnement et du contexte social était peu – voire pas du tout – évoqué. En cela, même si leur point commun était le rôle de l'action des enfants, Montessori, Freinet et Decroly se différenciaient de Piaget par l'ardeur qu'ils mettaient à concevoir des environnements pédagogiques et sociaux favorables aux progrès de l'enfant. Ils croyaient réellement à l'impact du contexte, ce qui pour Piaget était trop empiriste.

Toutefois, Piaget a préconisé les meilleures façons de solliciter les opérations logiques internes de l'enfant dans l'éducation par l'action (voir son rapport pour l'Unesco, *Où va l'éducation*, publié en 1972). Mais souvent, les professeurs des écoles ont, à juste titre, ressenti la théorie piagétienne comme une contrainte à la pratique pédagogique, un « calendrier de stades de développement » bien arrêté, un peu trop

rigide, à respecter (parfois à attendre !), plutôt que comme un levier pour faire progresser les enfants.

Un autre psychologue de l'enfant du ^{xx}e siècle, le Russe Lev Vygotski (1896-1934), a au contraire théorisé la façon dont les interactions sociales pouvaient directement contribuer à la construction des opérations mentales de l'enfant – l'école étant ici un maillon essentiel. Cette théorie de l'apprentissage a émergé dans le contexte soviétique et marxiste consécutif à la révolution de 1917 en Russie. Elle ne fut connue que très tardivement en français par une traduction de l'ouvrage *Pensée et langage* en 1985 (déjà paru en anglais en 1962 ; édition originale en russe, 1934).

Ce qui intéressait Vygotski, c'était la construction historico-culturelle de l'intelligence, c'est-à-dire les outils sociaux tels le langage. Selon lui, l'intériorisation des activités pratiques de l'enfant en activités mentales de plus en plus complexes était assurée par les mots, origine de la formation des concepts. Le langage dit « égocentrique » de l'enfant qui ne se parle qu'à lui-même ou accompagne ses gestes par la parole (que Piaget voyait négativement) était pour Vygotski essentiel, positif, car à l'origine du langage intérieur, régulateur des actions (le contrôle interne). C'est ce que l'on appelle aujourd'hui en sciences cognitives les fonctions exécutives du cortex préfrontal, situé à l'avant du cerveau. Alexandre Luria, neurologue russe très influencé par Vygotski, a été le père fondateur de ce domaine de recherche neuroscientifique dans les années soixante (voir *Les fonctions corticales supérieures de l'Homme*, 1962, et, plus récemment, les travaux consécutifs du neurologue américain Joaquin Fuster sur le cortex préfrontal et ses fonctions régulatrices, 1997, 2003).

La notion vygotskienne qui a réellement fait fureur en psychologie de l'enfant et en pédagogie est la « zone proximale de développement » (ou « de proche développement »). Cette notion rend compte des rapports entre apprentissage et développement au cours de l'histoire sociale de l'enfant. Celui-ci peut, à tout moment, être caractérisé sous deux aspects : (i) son niveau de développement actuel, tel qu'on peut l'évaluer à l'aide d'épreuves, standardisées ou non (celles de Binet ou de Piaget par exemple), et (ii) son niveau de

développement potentiel, correspondant à ce qu'il est capable de faire avec l'aide d'un adulte à un certain moment et sera capable de réaliser seul ensuite. Bien différente des stades fixes du développement logique chez Piaget, c'est ici une conception dynamique du développement cognitif, en contexte social, plus proche des progrès fulgurants que pouvait par exemple déclencher Maria Montessori chez les enfants dont elle s'occupait.

C'est aussi un apprentissage à l'autonomie, comme dans l'éducation nouvelle, car la zone proximale de développement a certes une limite inférieure (ce que l'enfant sait faire seul) et une limite supérieure (ce qu'il sait faire avec l'aide de l'adulte), mais le but de Vygotski était qu'elle s'intériorise en un espace interne de développement. La structure mentale, plutôt que d'être logique et auto-construite comme chez Piaget, est ici (en partie au moins) sociale et d'origine externe.

C'est donc cette potentialité, plus ou moins actualisable lors d'une interaction pédagogique, que Vygotski nommait la zone proximale de développement : « [...] L'élément central pour toute la psychologie de l'apprentissage est la possibilité de s'élever dans la collaboration avec quelqu'un à un niveau intellectuel supérieur, la possibilité de passer, à l'aide de l'imitation, de ce que l'enfant sait faire à ce qu'il ne sait pas faire. C'est là ce qui fait l'importance de l'apprentissage pour le développement » (1985, p. 272-273)

Outre l'exemple de l'imitation qui est ici citée, il s'agit de tous les « contextes intersubjectifs » qui constituent des fenêtres de développement par lesquelles les enfants entrent dans la culture humaine. En dehors des apprentissages spontanés, comme le langage oral chez le tout jeune enfant, l'école est le vecteur principal de ces contextes sociaux : le maître ou la maîtresse qui conduit l'enfant, grâce à des situations aménagées, à se poser de nouvelles questions sur des contenus à apprendre (les programmes scolaires).

Soulignons enfin l'importance accordée par Vygotski aux contradictions dans la pédagogie. Selon lui, le moteur du développement cognitif se trouvait dans les réactions (réponses globales de l'organisme) aux contradictions entre (i) les conceptions

quotidiennes des élèves et (ii) celles, élaborées, transmises par le maître. Dépasser ces contradictions, les surmonter, était en quelque sorte le travail personnel de l'élève ; une dialectique pour son cerveau, dans un processus de constructivisme social.

Un autre psychologue du développement, l'Américain Jerome Bruner (1915-2016), a réalisé des travaux complémentaires à ceux de Vygotski – inspiré aussi, comme Montessori et les pédagogues de l'éducation nouvelle, par John Dewey aux États-Unis. Dans le développement cognitif par l'action, l'image ou le langage, Bruner soulignait la fonction d'étayage (*scaffolding* en anglais), c'est-à-dire les interactions de tutelle où le savoir de l'enfant évolue avec l'aide indispensable du milieu qui l'entoure. C'est notamment le rôle des parents et de l'école, tuteurs par excellence du développement. Mais dans cette intersubjectivité, il faut créer une relation de confiance, soulignait Bruner, penser ensemble avec l'enfant dans un but précis et cela dès les structures de communication précoces chez le bébé et le jeune enfant comme l'attention visuelle conjointe vers un objet. Dès lors, remarquait-il, l'intention d'apprendre des élèves est directement tributaire de la posture de soutien social adoptée à leur égard par les adultes (voir Baldwin *et al.*, 1996 ; Csibra & Gergely, 2009 ; Egyed *et al.*, 2013 ; Meltzoff *et al.*, 2009 ; Senju & Csibra, 2008, pour des études expérimentales et pédagogiques dans cet esprit chez le bébé et l'enfant). On retrouve ici, avec force, Montessori, Freinet et Decroly. Tout cela faisait attribuer à Bruner un grand poids à la culture humaine, si bien résumé dans le titre de son dernier ouvrage, publié en français juste avant sa disparition récente à l'âge de 100 ans : *Car la culture donne forme à l'esprit : De la révolution cognitive à la psychologie culturelle* (2015).

Burrhus F. Skinner : du laboratoire à la classe, l'enseignement programmé

Pour clore ce chapitre historique, voici une dernière et importante contribution aux fondations de la neuropsychologie, celle de l'Américain Burrhus Skinner (1904-1990). Éminent représentant du comportementalisme avec son principe de conditionnement opérant, Skinner a inventé l'enseignement programmé.

Dans l'histoire de la psychologie, Edward Thorndike (1874-1949) avait étudié les courbes d'apprentissage d'animaux en cage, découvrant les lois de l'exercice et de l'effet, une psychologie minimale du stimulus-réponse (s-r). Cette loi du renforcement par la récompense sera reprise un peu plus tard par Skinner qui inventera le conditionnement opérant sur des rats en cage : le rat doit agir (appuyer sur un levier) pour apprendre. C'est le processus opposé, de type II, ou plus exactement complémentaire, du conditionnement répondant, de type I, qu'avait déjà découvert au début du xx^e siècle le psychologue et Prix Nobel russe Ivan Pavlov (1849-1936) sur des chiens d'expérience : ils salivaient à la seule vue de la nourriture ou de la personne qui l'apportait, observation qualifiée de « sécrétion psychique », différente de celle provoquée par la faim.

À noter, comme le remarque Richelle (1977), qu'au-delà du simple mécanisme skinnerien de départ dans lequel une action (qui peut être le fruit du hasard) entraîne une récompense, ce qui est remarquable est ce qui survient à la suite de cette conjonction d'événements : une augmentation du débit des réponses si elles sont suivies de renforcements positifs, comme une ampleur des progrès, le goût d'apprendre. En outre, pour complexifier le modèle s-r initial, il est possible d'ajouter des conditions au contexte d'apprentissage, appelées « stimuli discriminatifs » (au laboratoire, un signal auditif par exemple), de telle sorte que l'action ne soit renforcée qu'en présence de ces éléments de contexte. Appliqué à des situations naturelles, on comprend que ce principe soit puissant.

La découverte de ces lois fondamentales de l'apprentissage animal

– on se rappelle depuis Darwin que l'Homme est un animal (Reisse & Richelle, 2014) – a concouru à la formation, en psychologie, du courant dit « béhavioriste », fondé sur l'étude objective du comportement. Le béhaviorisme, souvent décrié – à tort – dans l'histoire récente de la psychologie à l'ère du cognitivisme, a néanmoins mis le doigt sur des mécanismes essentiels de l'apprentissage par conditionnement (type I ou II) qui restent valables aujourd'hui, tant pour les études de psychologie cognitive que celles de neurosciences dont l'intérêt n'a de sens qu'en relation avec une étude fine des comportements. C'est particulièrement vrai des comportements d'apprentissage en neuropédagogie.

Mais, comme le souligne très bien Tardif (2016), l'influence de Skinner sur l'éducation a souvent été présentée comme pernicieuse par des intellectuels américains et européens, voyant en lui « un dompteur de rats qui voulait manipuler les enfants plutôt que les éduquer »¹¹ ! Mon objectif est, ici, de corriger cette malhonnête caricature, dans le même esprit que le fit, dès les années soixante-dix, Marc Richelle, spécialiste de Skinner (auteur de *B.F. Skinner ou le péril behavioriste*, Mardaga, 1977).

En appliquant ses idées à l'éducation humaine, ce que Skinner a simplement voulu suggérer, c'est que la classe peut être considérée, modélisée, comme un environnement positif d'apprentissage, au sens presque scientifique et expérimental du terme, dont l'enseignant est, par définition (par statut même), le maître. Dès lors, en vertu des mécanismes fondamentaux découverts grâce à la science des apprentissages en laboratoire (conditionnement opérant, renforcement par la récompense, débit), le maître skinnerien – comme le résume très bien Tardif déjà cité – « se tient au centre de l'action, il observe sans cesse les comportements de ses élèves et les renforce au fur et à mesure. Par exemple, plutôt que de rester immobile à l'avant de la classe, il déambule parmi ses élèves et leur procure sans cesse des feed-back positifs, en fonction d'objectifs propres à chacun »¹¹.

À n'en pas douter, Montessori, pédagogue bienveillante, adaptée à l'élan vital et au rythme de chaque élève dans sa *casa dei bambini* à Rome, de même que Freinet et ses plans individuels de travail conçus pour ses élèves dans son école de Vence (contrats d'objectifs, fichiers

autocorrectifs personnalisés), chacun à leur manière tendait vers ce modèle expérimental skinnerien idéal !

C'est aussi à Skinner que l'on doit des arguments scientifiques forts – et pas seulement idéologiques, permissifs ou laxistes – pour l'abandon des punitions à l'école, car, dans son modèle, c'est par les récompenses et non les punitions que l'apprentissage s'opère efficacement ! Ce principe est aujourd'hui confirmé physiologiquement à propos du rôle négatif de la peur sur la mémorisation (Allen & Monyer, 2013 ; Donato *et al.*, 2013).

La conception skinnerienne différenciée de l'enseignement fut aussi un argument pour l'étayage, tel qu'il vient d'être défini dans l'approche sociale et culturelle de Bruner. Ces approches ne s'opposent pas.

Enfin, dans cet esprit, Skinner a inventé, dès la fin des années soixante, l'enseignement programmé (*The Technology of Teaching*, 1968), ce qui était une contribution majeure à la pédagogie (traduction française, chez Mardaga, *La révolution scientifique de l'enseignement*, 1969). Il s'agissait d'un dispositif technique où l'élève devait répondre à des questions. Chaque bonne réponse permettait de passer à l'étape suivante, ce qui constituait la récompense ou renforcement positif. Pour Skinner, cette motivation et ce contrôle continu, différencié, étaient plus efficaces pour l'école que les notes et les examens classiques, trop souvent vécus négativement. C'est, aujourd'hui, le principe de tous les jeux éducatifs sur ordinateur ou tablette tactile, à grand succès, depuis la révolution numérique du début des années 2000 ! L'apprentissage s'adapte pas à pas au rythme de chaque élève, avec des renforcements positifs gradués. C'est aussi le principe, en neurosciences, des dispositifs de neurofeedback récemment mis au point (Sitaram *et al.*, 2017, pour une revue), qui donnent, lors d'un jeu cognitif informatisé, une information de renforcement *via* un feed-back online sur l'activité (le comportement) du cerveau de l'individu.

Pour améliorer les apprentissages à l'école, il faut désormais rassembler, faire converger, l'ensemble de ces approches fondées (i) sur l'enfant, son élan vital, ses actions, sa curiosité, ses capacités

d'adaptation, sa logique interne de raisonnement (Montessori, Freinet, Decroly, Binet, Piaget), ainsi que le contexte social (Vygotski, Bruner, Skinner) et (ii) son cerveau finement exploré, en sciences cognitives, par l'imagerie cérébrale et l'étude des processus mentaux. Ce travail contemporain de synthèse, d'allers-retours du labo à l'école, commence à être réalisé par les scientifiques, notamment en psychologie expérimentale du développement cognitif appliquée à l'éducation scolaire et déjà, aussi, par des praticiens désireux d'innovation pédagogique et soucieux d'intégrer rapidement les progrès de la science : le succès de l'ouvrage de Céline Alvarez (2016), jeune professeure des écoles déjà citée, combinant les apports de Montessori et des sciences cognitives, en est un indicateur.

On a vu, dans cette première partie, qu'au début du ^{xx}e siècle, le courant de l'éducation nouvelle a réuni des médecins, des psychologues et pédagogues passionnés, de Montessori en Italie à Decroly en Belgique, auprès d'enfants en grande difficulté, puis de tous les enfants. Avant Piaget, un psychologue comme Binet s'était aussi intéressé aux questions scolaires par le biais des différences interindividuelles d'intelligence et d'attention chez les enfants, aux sources du QI.

En ce début de ^{xxi}e siècle, ce sont encore des médecins, des biologistes neuroscientifiques, des psychologues et des philosophes, renforcés par des informaticiens, que le courant des sciences cognitives réunit et agrège en une approche renouvelée de l'éducation. Il ne s'agit pas de tout réinventer, mais au contraire de capitaliser les acquis intéressants et scientifiquement validés de l'éducation nouvelle, depuis un siècle (avec ses racines bien antérieures, dès les Lumières, voire l'Antiquité : Houdé, 2016a) et les découvertes plus récentes sur le cerveau et la cognition des enfants.

Notes

1 Voir, par exemple, *Les Grands Dossiers des Sciences Humaines*, n° 45 : « Les grands penseurs de l'éducation », p. 20-21, 2016.

2 Dans cet esprit et, aussi, contre l'approche psychanalytique culpabilisante et inefficace de ce trouble envahissant du développement, Thomas Bourgeron et d'autres chercheurs en neurosciences tels Yves Agid, Jean-Pierre Changeux, Stanislas Dehaene et Marion Leboyer ont signé le 11 novembre 2016 une tribune dans *Le Monde* intitulée « Autisme : il est urgent de changer de modèle ». Ils proposent, en la matière, une médecine fondée sur la science (génétique, biologie moléculaire, neurosciences cognitives et sociales) pour réduire l'incidence de cette pathologie (1 % des enfants) et améliorer sa prise en charge en France.

3 Hervé Glasel est le fondateur et directeur à Paris des écoles du CERENE (Centre de Référence pour l'Évaluation Neuropsychologique de l'Enfant) : <http://www.cerene-education.fr/>

4 Conférence TED « Que pensent les bébés ? », présentée en 2011 par Alison Gopnik : <http://tedtalkspsychology.com/what-do-babies-think-with-alison-gopnik/>

5 Ce laboratoire est aujourd'hui encore en pleine activité, doté des technologies de pointe en neuro-imagerie informatisée, au quatrième étage de la Sorbonne, 46 rue Saint-Jacques à Paris, et l'auteur de ce livre le dirige depuis 1998.

6 Binet suivra de très près la sélection et les progrès des enfants alors dits « arriérés » destinés aux classes expérimentales mises en place par le Gouvernement français. Il y développa une pédagogie particulière pour eux, « l'orthopédie mentale » : réduction de la part d'intelligence verbale, de français, d'histoire-géographie, etc., pour renforcer la gymnastique, le chant et les travaux manuels. Les progrès cognitifs de ces enfants, retournant parfois dans des classes normales lors du CM1 (4^e primaire en Belgique), étaient la plus grande fierté de Binet !

7 Darwin n'appréciait pas, à juste titre, ce cousin qui allait jusqu'à préconiser, à partir de sa théorie de la sélection naturelle, une idéologie politique pseudo-scientifique très dangereuse, l'eugénisme ou sélection artificielle des génies en vue d'améliorer la race. C'est toutefois dans ce contexte idéologique qu'est née, avec Galton, la psychologie différentielle scientifique, en particulier ses outils de mesure statistique : comparaison des individus entre eux (différences interindividuelles) et classement par rapport à une norme, une moyenne. Ont ainsi été successivement inventées, dans le laboratoire de Londres, les méthodes de corrélation (Galton, Pearson) et d'analyse de la variance (Fisher). Au-delà de la psychologie différentielle, c'était la naissance des statistiques modernes, telles qu'elles sont aujourd'hui utilisées dans toutes les sciences.

8 Le QI a suscité ensuite en pédagogie – par réaction, opposition – un engouement pour la théorie des intelligences multiples d'Howard Gardner (1997) qui a fait éclater l'idée d'une quantification unique et globale de l'intelligence (facteur général, dit « G »), souvent verbale et logico-mathématique, telle qu'évaluée classiquement à l'école et non fondée, par exemple, sur des capacités émotionnelles, artistiques (visuospatiales, musicales) ou sportives qui peuvent pourtant aussi correspondre à des formes de l'intelligence. À la question qui m'est souvent posée : « La théorie de Gardner est-elle vérifiée par les neurosciences ? », ma réponse est de dire que l'auteur lui-même n'est pas un neuroscientifique et n'a pas réalisé

d'expérimentations sur le cerveau qui prouveraient sa théorie, mais qu'il a eu le mérite d'introduire la notion très « biologiquement compatible » de diversité ou variation dans l'intelligence humaine et qu'en outre, si on remplace le mot pluriel « intelligences » par « formes cognitives », les données d'imagerie cérébrale sont aujourd'hui nombreuses à démontrer des réseaux neuronaux différents, bien que partiellement enchevêtrés, pour la cognition logico-mathématique, la cognition visuospatiale, la cognition linguistique, la cognition musicale, la cognition sociale, la cognition émotionnelle et la cognition motrice ou corporelle. Reste à ne pas déduire, trop hâtivement, des raccourcis pédagogiques de la théorie de Gardner (ce qui est parfois le cas), ni inversement d'en faire un neuromythe, ce qu'elle n'est pas non plus (voir Houdé, 2015, « Plusieurs intelligences détectées dans le cerveau », *Cerveau & Psycho*, 68, p. 46-53).

9 Bergström, J. (1893). Experiments upon physiology memory by means of the interference of associations. *American Journal of Psychology*, 5, 356-369 ; (1894). The relation of the interference to the practice effect of an association. *American Journal of Psychology*, 6, 433-442.

10 « [...] Bien que ce point important d'une adaptation du mécanisme d'inhibition plus lente chez certains enfants ait été relevé par Binet en 1900, il faut attendre des études récentes pour explorer cette hypothèse. (Houdé, 1995, *Rationalité, développement et inhibition*, Paris, PUF) (Boujon & Lemoine, 2002, p. 84).

11 M. Tardif, « Skinner : Du laboratoire à la classe », *Les Grands Dossiers des Sciences Humaines*, n° 45 : « Les grands penseurs de l'éducation », p. 54-55, 2016.

Chapitre II

Sciences cognitives et sciences de l'éducation

Ce champ interdisciplinaire est très nouveau et commence à être intégré dans les manuels de pédagogie destinés aux enseignants, par exemple chez Nathan (Houdé, 2017a). Nous en énonçons ici les éléments essentiels.

Rien n'est plus amusant et instructif pour comprendre la biologie réellement humaine que d'observer un enfant qui apprend à l'école ou ailleurs. Qu'est-ce que la connaissance ? Comment l'acquiert-on ? Voilà deux questions essentielles que se posent les sciences dites « cognitives » (de « cognition » ou fonction de connaissance : perception, apprentissage, mémoire, langage, raisonnement, intelligence, etc.). Comme le disait déjà Piaget, le développement de l'intelligence chez l'enfant est la forme optimale de l'adaptation biologique. Mais il lui manquait toutefois, à l'époque, les moyens technologiques pour l'observer *in vivo*.

Aujourd'hui, avec les progrès fulgurants et combinés de l'informatique, des sciences cognitives et de l'imagerie cérébrale, on peut produire sur ordinateur des images numériques tridimensionnelles reliées à l'activité des neurones en tout point du cerveau de l'adulte ou de l'enfant. En particulier, au cours des apprentissages cognitifs. C'est l'une des plus importantes révolutions scientifiques survenues au tournant des ^{xx}e et ^{xxi}e siècles.

La révolution des sciences cognitives

Dans le *Vocabulaire de sciences cognitives* (Houdé *et al.*, 1998), en collaboration avec des spécialistes de neuroscience, de psychologie, d'intelligence artificielle, de linguistique et de philosophie de l'esprit, nous avons décrit l'histoire récente de ces nouvelles sciences cognitives qui, depuis le milieu du xx^e siècle, tentent d'élucider par l'expérimentation, la modélisation et l'usage de technologies de pointe (dont l'imagerie cérébrale), le mystère de l'esprit et ses rapports avec la matière : le cerveau, le corps et l'ordinateur (voir Andler, 1992, pour une introduction antérieure ; Andler, 2016, pour un point de vue critique).

L'origine de cette révolution, située dans les années quarante/cinquante, est la naissance de la cybernétique (du grec *kubernêtikê*, de *kubernân*, « gouverner »), science des mécanismes de commande, de pilotage ou de contrôle (autorégulation) des êtres vivants et des machines. Au Siècle des Lumières, déjà, ce programme était annoncé par le philosophe Julien Offray de La Mettrie, contemporain de Rousseau, dans *L'Homme machine* (1748) qui préconisait de considérer l'esprit comme une organisation sophistiquée de la matière dans le cerveau humain. On se rappelle aussi, à la même époque, les automates de Vaucanson.

Aujourd'hui, la cybernétique a laissé la place à la robotique et à l'intelligence artificielle (IA) qui, après de timides succès dans les années quatre-vingt et des espoirs déçus dans les années quatre-vingt-dix, connaît un regain extraordinaire d'intérêt dans tous les domaines de la société où des machines – à la puissance de calcul accrue – et des applications de plus en plus intelligentes sont inventées chaque jour. Ces innovations sont démultipliées, dans des start-up d'IA notamment, sous l'impulsion de la révolution numérique et des progrès en matière de développement de la logique et de l'algorithmique.

Dans cet esprit, il existe aujourd'hui de grands projets de recherche internationaux en Europe et aux États-Unis qui visent à reconstituer les connaissances actuelles sur le cerveau humain, pièce

par pièce, dans des modèles et simulations informatiques, sous la forme de circuits dits « neuromorphiques » dotés de puces spécialisées dans la simulation des neurones et de leurs connexions.

Ce renouveau de l'IA est corrélatif à l'essor important des neurosciences. En France, dans les années quatre-vingt, c'est au neurobiologiste Jean-Pierre Changeux que l'on doit d'avoir anticipé, avec *L'Homme neuronal* (1983), ce nouveau champ des sciences humaines « neurocognitives », en relation avec l'imagerie cérébrale (voir aussi *L'Homme neuronal, trente ans après* par Changeux et al., 2016). L'ambition était grande : celle d'une science naturelle et cognitive de l'humain ; le cerveau dans son corps et en contexte social. Nous en sommes encore aujourd'hui aux tout premiers pas de cette science de la pensée et des apprentissages, en particulier en matière d'éducation scolaire.

Des sciences de l'éducation peu neuroscientifiques

Il ne faut pas se méprendre sur le caractère matérialiste et prétendument réductionniste qu'incarnerait cette approche neuroscientifique – ainsi dénoncée, souvent, par les sciences de l'éducation traditionnelles ou par la psychanalyse, toutes griffes dehors, qui « occupent la place » en France (et peut-être ailleurs aussi) dans les Écoles supérieures du Professorat et de l'Éducation (ESPE). Au contraire, singularité (liberté, citoyenneté, etc.) et cerveau ne s'opposent pas, ni cerveau et histoire, sociologie (milieu, habitus), philosophie, administration, organisation ou politique de l'éducation, ni même encore cerveau et didactique ou enseignement spécialisé. Le cerveau humain est social et culturel ! C'est celui de l'enfant dans son corps et en contexte.

Comme l'a très bien écrit Antonio Damasio : « En découvrant les secrets de l'esprit, nous le percevons comme l'ensemble des phénomènes biologiques le plus élaboré de la nature, et non plus comme un mystère insondable. L'esprit survivra à l'explication de sa nature [et l'éducation aussi], tout comme le parfum de la rose continue d'embaumer, même si l'on en connaît la structure moléculaire. » (2000, p. 81 ; voir aussi Damasio, 2017) Il faut toujours se rappeler cela en matière d'éducation et ne pas craindre le prétendu réductionnisme des neurosciences : (i) elles n'enlèvent rien mais, au contraire, ajoutent des informations à l'explication des phénomènes, à la compréhension de l'enfant et des apprentissages, (ii) l'éducation n'est pas un processus insondable. Rappelons-nous Montessori à propos de l'enfant : quel étonnement qu'on ait laissé dans la plus profonde obscurité le fonctionnement normal de l'âme de l'enfant !

Sans céder à une vision trop scientiste et naïve, voire idéologiquement dangereuse, d'une technoscience de l'éducation parfaitement contrôlée et contrôlable, on ne peut refuser l'idée qu'une recherche pédagogique nouvelle, exploitant les ressources actuelles de l'imagerie cérébrale et de la psychologie expérimentale, puisse éclairer certains mécanismes neurocognitifs élémentaires d'apprentissage dont dépendent des phénomènes éducatifs, sociaux et culturels plus

complexes.

Avec l'imagerie cérébrale, ce que l'on découvre est la structure et le fonctionnement du cerveau qui apprend. Or ce cerveau, « théâtre de l'éducation », lieu de toute synthèse individuelle ou collective, est l'angle mort de l'Éducation nationale. On éduque encore trop souvent aujourd'hui « en aveugle » des millions de cerveaux, c'est-à-dire en manipulant les entrées (rythmes scolaires, nombre d'élèves par classe, etc.) et en observant les sorties (résultats aux évaluations : contrôles, PISA¹), sans bien connaître les mécanismes internes du cerveau qui apprend.

La psychologie du développement alliée à l'imagerie cérébrale

Tous les organes du corps se développent et imposent leurs lois à notre santé. C'est le rôle de la médecine expérimentale de les découvrir. De même, le cerveau, organe de la pensée et de l'apprentissage, se développe et impose ses lois à l'éducation. C'est le rôle des « nouvelles sciences de l'éducation » de les découvrir, en lien avec l'imagerie cérébrale (voir l'encart « Les techniques d'imagerie cérébrale ») et la psychologie expérimentale. Michael Posner, l'un des psychologues pionniers en la matière, écrivait dans la revue *Science* en 1993 : « Le microscope et le télescope ouvrirent, en leur temps, de vastes domaines de découvertes scientifiques insoupçonnées. Maintenant que de nouvelles méthodes d'imagerie permettent de visualiser les systèmes cérébraux de la pensée normale et pathologique, la cognition humaine pourrait être à l'aube d'une période aussi riche. » (p. 673-674).

Les techniques d'imagerie cérébrale

Depuis les années quatre-vingt-dix, deux principales techniques d'imagerie cérébrale sont utilisées pour étudier les réseaux neuronaux qui sous-tendent les fonctions cognitives chez l'Homme : la Tomographie par Émission de Positrons (TEP) et l'Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf), l'une et l'autre assistées par ordinateur (Dehaene, 1997 ; Houdé *et al.*, 2002). Dans le cas de la TEP, on mesure le débit sanguin cérébral dans différentes régions du cerveau par le biais de la concentration d'une molécule d'eau radioactive injectée à l'individu qui passe l'expérience (avec une dose très faible de radioactivité artificielle, sans danger pour lui). Dans le cas de l'IRMf, on suit la concentration en désoxyhémoglobine, une molécule qui reflète l'oxygénation du sang (technique non invasive et

indolore utilisée aujourd'hui chez l'enfant d'âge préscolaire et scolaire dans des protocoles validés préalablement par un comité d'éthique ; Houdé *et al.*, 2010, 2011).

Dans les deux cas, la mesure tient à ce que le débit sanguin augmente localement pour réguler le métabolisme neuronal des régions du cerveau qui participent à l'accomplissement de la tâche cognitive proposée par le psychologue. On voit ainsi le cerveau « en action » au cours des processus de pensée et d'apprentissage. La résolution (précision) spatiale de l'IRMf est très bonne, de l'ordre du millimètre – sa résolution temporelle, de l'ordre de la seconde. Afin d'obtenir, en complément, une résolution temporelle maximale (en millisecondes), on utilise la Magnétoencéphalographie (MEG) ou l'Électroencéphalographie (EEG), technique plus classique, mais aujourd'hui à haute densité (EEG-HD).

Ces technologies d'imagerie du cerveau s'ajoutent à la boîte à outils traditionnelle des psychologues (issue de Wundt, Binet, etc.) qui comportait déjà, depuis les années quatre-vingt, grâce aux premiers ordinateurs (après les chronomètres manuels), des mesures comportementales fines, en millisecondes, des temps de réponse : la chronométrie mentale. Les expériences de psychologie sont ainsi assistées par ordinateur et programmées avec des logiciels spécialisés (communs à tous les laboratoires de sciences cognitives dans le monde) afin de bien contrôler, de façon synchronisée, les paramètres étudiés : stimulations présentées à l'écran, types de réponses, temps de réponse et signal cérébral, hémodynamique (TEP, IRMf) ou électrique (MEG, EEG).



Figure 3 – Un jeune enfant qui va réaliser une expérience de psychologie en IRMf. L'enfant est délicatement installé dans la machine, sous les yeux de ses parents qui restent présents durant toute l'expérience (O. Houdé *et al.*, 2011). Clichés d'Anne Van der Stegen.

C'est grâce à cette instrumentation performante que l'on peut aujourd'hui explorer, d'un regard neuf, la question des apprentissages à l'école. C'est le domaine de la neuroéducation ou neuropédagogie. Il s'agit de comprendre comment les comportements et processus d'apprentissage sont contraints par les lois de fonctionnement du cerveau – que les professeurs doivent donc connaître (comme les autres organes du corps pour un médecin) – et, en retour, comment l'environnement, l'école en particulier (telle pédagogie, telle méthode, telle pratique) modifie et fait progresser le cerveau des enfants. Déjà Piaget, par la seule étude clinique et systématique des comportements infantiles, cherchait à comprendre scientifiquement ces questions grâce à la psychologie du développement cognitif. À cet égard, il était un précurseur des sciences cognitives.

Actuellement, les sciences de l'éducation universitaires (dans les facultés ou départements du même nom) ne sont pas très ouvertes aux apports des sciences cognitives, en France pour le moins. C'est dès lors la psychologie du développement qui, dans les traces de Piaget, joue très naturellement le rôle d'interface entre le cerveau, les processus d'apprentissage de l'enfant et l'école.

Quelles découvertes après Piaget ?

La conception de l'intelligence de l'enfant selon Piaget était incrémentale, c'est-à-dire stade après stade, de plus en plus élaboré (Piaget & Inhelder, 1966). C'est le « modèle de l'escalier », intuitivement cohérent avec la succession linéaire des âges dans l'enfance ou des classes à l'école. Pour rappel, chaque marche correspondait à un grand progrès, à un stade bien défini ou mode (structure) unique de pensée dans la genèse de l'intelligence logico-mathématique : de l'intelligence sensori-motrice du bébé (0-2 ans) fondée sur ses sens et ses actions, à l'intelligence conceptuelle (nombre, catégorisation, raisonnement), d'abord concrète chez l'enfant (vers 7 ans), puis abstraite et formelle chez l'adolescent (vers 12-14 ans) et l'adulte.

Un bébé plus intelligent qu'on ne l'imaginait

La nouvelle psychologie du développement cognitif, après Piaget, remet en cause ce « modèle de l'escalier » ou, pour le moins, indique qu'il n'est pas le seul possible (Houdé, 2004).

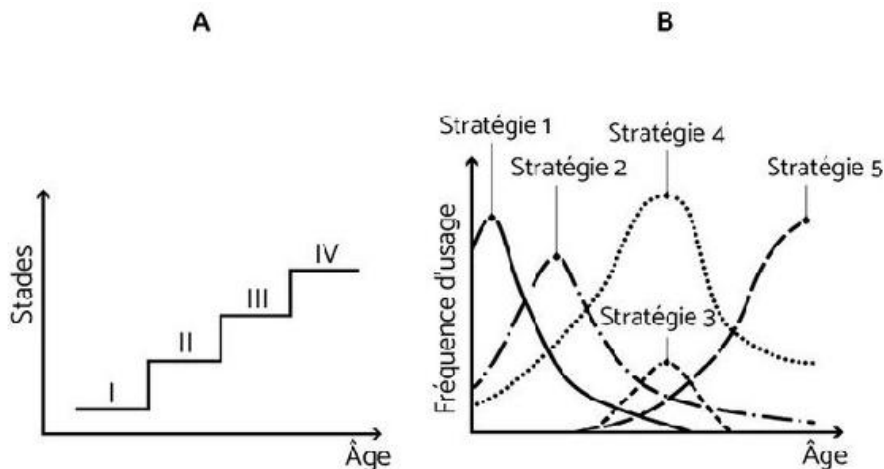
D'une part, bien avant l'école, il existe déjà dans le cerveau des bébés des capacités cognitives assez élaborées (des algorithmes ou règles), c'est-à-dire des connaissances proto-physiques, proto-mathématiques (arithmétiques, statistiques, etc.), proto-logiques et psychologiques (sens social et moral, théories de l'esprit), insoupçonnées de Piaget et non réductibles à un fonctionnement strictement sensori-moteur – ou première « marche de l'escalier ». Le bébé est donc bien plus intelligent que ne l'imaginait Piaget (voir Dehaene-Lambertz & Spelke, 2015 ; Hamlin *et al.*, 2007 ; Onishi & Baillargeon, 2005 ; Spelke, 2000 ; Wynn, 2000 ; etc.). Nous avons déjà cité, à cet égard, les travaux de Gopnik (2012, 2017).

D'autre part, la suite du développement de l'intelligence jusqu'à l'adolescence et l'âge adulte compris (la dernière « marche » de Piaget : la logique formelle) est jalonnée d'erreurs, de biais perceptifs

et cognitifs, de décalages inattendus, incluant des retours en arrière ou régressions non prédits par la théorie piagétienne (Houdé, 2014). C'est ce que Daniel Kahneman (2012) appelle le Système 1, intuitif ou heuristique et très rapide, par rapport au Système 2 plus lent, assez rarement appliqué selon lui, et qui correspond à la logique de Piaget. Kahneman a ainsi reçu en 2002 le prix Nobel d'économie – c'est le seul psychologue contemporain lauréat de cette distinction – pour avoir démontré les nombreux biais intuitifs de jugement, ou heuristiques erronées (Système 1), qui subsistent encore chez les adultes. Ce n'est dès lors pas qu'une question d'intuitions enfantines passagères (un stade préopératoire, avant l'âge de raison à 7 ans) comme le pensait Piaget.

Un développement dynamique et non linéaire

Ainsi, plutôt que de suivre une ligne ou une flèche qui irait du sensori-moteur à l'abstrait (telle une oblique à travers l'escalier des stades de Piaget), l'intelligence du cerveau avance de façon beaucoup plus dynamique et non linéaire (non incrémentale), avec de multiples stratégies cognitives qui se chevauchent (voir Siegler, 2000, 2001, pour une telle modélisation). Dans le cerveau de chaque enfant ou adulte, des heuristiques très rapides et intuitives ou biais cognitifs (Système 1, D. Kahneman) et des règles logiques ou algorithmes dits « exacts »² (Système 2, J. Piaget) peuvent entrer en compétition à tout moment. C'est ce qu'on appelle des « conflits cognitifs » (voir la figure 4).



Les trois systèmes cognitifs (O. Houdé)

Système heuristique

Pensée « automatique » et intuitive

↓ Fiabilité

↑ Rapidité



1

3



Système d'inhibition

Interrompt le système heuristique pour activer celui des algorithmes

→ Fonction d'arbitrage

Système algorithmique

Pensée réfléchie « logico-mathématique »

↑ Fiabilité

↓ Rapidité



2

Figure 4 – Schématisation des modèles du développement cognitif. (A) stades « en escalier » (J. Piaget) ou (B) dynamique, selon des vagues (stratégies multiples) qui se chevauchent (R. Siegler). Lorsque ces stratégies entrent en conflit, il y a trois systèmes : les heuristiques dominantes (D. Kahneman), les algorithmes exacts ou règles logiques (J. Piaget)

Pour dépasser ces conflits, l'adaptation de l'ensemble du cerveau, c'est-à-dire l'intelligence ou la flexibilité, dépend de la capacité de contrôle exécutif du cortex préfrontal (Système 3) – en lien avec les émotions et les sentiments – à inhiber le Système 1 et à activer le Système 2, au cas par cas, selon le contexte. Inhiber, c'est apprendre à résister (Houdé, 2017b). C'est utile tant pour les enfants que pour les adultes, car ces derniers restent encore de mauvais raisonneurs dans beaucoup de situations où leur Système 1 domine, souvent inconsciemment (Kahneman, 2012).

Par exemple, pour tester la solidité du raisonnement logique d'un enfant, demandez-lui si la déduction suivante est correcte : a) les éléphants sont des mangeurs de foin, b) le foin n'est pas lourd ; cela permet-il de conclure que c) les éléphants sont lourds ? En classe, les enfants d'école primaire répondent souvent, trop vite, que « oui », alors qu'en fait rien ne permet, évidemment, de déduire logiquement cette conclusion (c) des prémisses, c'est-à-dire des deux premières phrases de l'exercice (a et b). Il a été mesuré expérimentalement qu'au cours du développement de l'enfant, la difficulté de ce type de tâche si-alors (analogue à un syllogisme), comportant ici une conclusion très crédible mais non valide est de parvenir à inhiber le contenu sémantique de la conclusion (le réseau du cerveau dit de connaissances générales), c'est-à-dire ici la forte croyance des enfants quant au poids des éléphants (Moutier *et al.*, 2006). C'est l'heuristique de croyance (en général, c'est vrai). D'où leur réponse trop rapide et erronée qui s'arrête à cette seule connaissance (Système 1) sans raisonner sur la structure même du texte de l'exercice (Système 2).

Le Système 3 doit ici arbitrer en inhibant l'automatisme de pensée rapide du Système 1 (l'heuristique « les éléphants sont lourds ») pour activer la logique du Système 2 (le syllogisme si a-b, alors c) et réfléchir. Les deux premiers systèmes se développent en parallèle, car les jeunes enfants (même les bébés) ont déjà des capacités logiques (l'algorithme si-alors au niveau visuel, puis verbal), mais le Système 3 et sa capacité inhibitrice arrivent plus tard.

Ce cerveau dit « exécutif » dépend de la maturation lente du

cortex préfrontal. L'IRM anatomique (ou structurale) a démontré, au début des années 2000, que ce lobe antérieur du cerveau est le dernier à arriver à maturation (mesurée par un élagage de matière grise) au cours de l'enfance et de l'adolescence (Casey *et al.*, 2005 ; Changeux, 2008).

Pour les localisations cérébrales – que nous limitons ici le plus souvent aux grands lobes ou régions bien connues du cerveau dans la littérature neuroscientifique (voir la figure ci-dessous) –, le lecteur peut se référer, s'il souhaite plus de précisions, à notre ouvrage *Cerveau et psychologie* (Houdé *et al.*, 2002) ou à tout autre manuel et atlas de neurosciences.

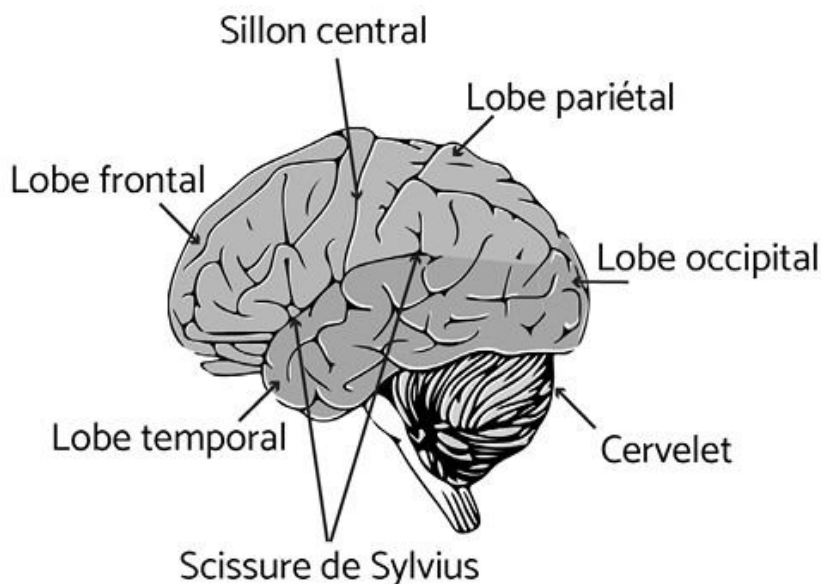


Figure 5 – Les grands lobes et sillons du cerveau humain.

Piaget revisité : heuristiques, algorithmes exacts et inhibition

Un autre exemple, dans le domaine logico-mathématique, permet de bien comprendre la généralité de ce phénomène. Il s'agit de la tâche de conservation du nombre de Piaget (voir le chapitre « Alfred Binet, Jean Piaget et Lev Vygotski : les psychologues de l'enfant »).

Devant deux rangées qui ont le même nombre de jetons (7 et 7, par exemple) mais qui sont de longueurs différentes (après l'écartement de l'une des deux rangées), jusqu'à 6-7 ans l'enfant considère qu'« il y en a plus là où c'est plus long ». Piaget croyait que l'enfant n'était pas logique (pas encore au bon stade), qu'il était intrinsèquement limité au seul Système 1. Or la difficulté est ici d'apprendre à inhiber l'heuristique « longueur égale nombre », alors même que l'enfant est déjà capable de compter (Houdé, 2000).

Pour vérifier cette nouvelle interprétation, avec mon laboratoire nous avons mis au point une adaptation informatisée de la tâche des jetons de Piaget où la chronométrie mentale (l'ordinateur enregistrerait les temps de réponse en millisecondes) permettait de tester le rôle de l'inhibition chez l'enfant de 8 ans qui réussissait la tâche (Houdé & Guichart, 2001). L'idée était : (i) de faire résoudre à l'enfant une tâche de type Piaget (où, par hypothèse, il devait inhiber la stratégie « longueur = nombre ») ; (ii) de lui présenter, juste après, une situation où longueur et nombre covariaient (deux alignements de jetons où celui qui était le plus long contenait aussi le plus de jetons). L'enfant devait dès lors activer en (ii) la stratégie (l'heuristique) qu'il venait d'inhiber en (i). Les résultats ont indiqué que, dans ce dernier cas, l'enfant d'école élémentaire mettait un peu plus de temps pour répondre (environ 150 ms) que dans une situation contrôle où il n'avait pas dû résoudre d'abord la tâche de type Piaget.

Ce petit décalage de temps, statistiquement significatif, est ce qu'on appelle l'« amorçage négatif », démonstration expérimentale du fait que l'enfant avait bien dû inhiber, bloquer, la stratégie « longueur = nombre » pour réussir la tâche de Piaget. D'où le temps supplémentaire qu'il mettait à débloquer cette stratégie quand elle redevenait pertinente (souvenez-vous de l'observation de Binet en 1900 sur l'attention et l'adaptation). C'est une sorte de levée de la résistance ! Ce phénomène s'observe encore chez l'adulte (Borst *et al.*, 2012), ce qui montre que l'inhibition de l'heuristique reste toujours nécessaire.

Dans le cerveau, une heuristique est une stratégie très rapide, très efficace – donc économique pour l'enfant –, qui marche très bien, très souvent *mais pas toujours*, à la différence de l'algorithme exact,

stratégie plus lente et réfléchie, mais qui (appliquée sans erreur ou « bug ») conduit *toujours* à la bonne solution (le syllogisme, le comptage, etc.).

Vous vous posez peut-être la question de savoir d'où vient chez l'enfant ce type d'heuristique trompeuse du Système 1. De même que les règles logiques du Système 2 dont Piaget a bien étudié la construction, les régularités perceptives et sémantiques du Système 1 se construisent aussi (sans doute par un apprentissage probabiliste de type bayésien ; Meyniel & Dehaene, 2017). Elles sont renforcées culturellement à certains moments du développement et deviennent dominantes dans le cerveau. D'où vient l'heuristique « longueur égale nombre » ? Par exemple, sur les rayons ou linéaires des supermarchés, en général, il est vrai que la longueur et le nombre varient ensemble (covarient) : face à deux alignements de produits du même type, celui qui est le plus long contient aussi le plus de produits. Le cerveau de l'enfant détecte très tôt ce type de régularité visuelle et spatiale (« l'enfant est avide de saisir, c'est un véritable accumulateur », disait déjà Montessori).

De même, à l'école ou à la maison, quand on apprend les additions et les soustractions (ajouts/retraits) avec des objets sur une table, si l'on additionne, on ajoute 1 ou plusieurs objets ($1 + 1 + 1 + 1 + \dots$) et c'est plus long ; si l'on soustrait, c'est l'inverse. Donc là aussi, dans l'arithmétique élémentaire comme au supermarché, la longueur et le nombre covarient. C'est encore vrai dans les livres de « maths pour petits » ou sur les murs des classes. On y découvre en général la suite des nombres de 1 à 10 (ou des mots de nombre de un à dix) illustrée par des alignements d'objets de longueur croissante (des alignements d'animaux ou de fruits). Donc, quasiment partout, sauf dans la tâche de Piaget, la longueur et le nombre varient ensemble ! C'est ce qui crée l'heuristique. D'où l'intuition perceptive, visuospatiale, habituelle selon laquelle « longueur égale nombre ». La force de cette intuition du Système 1, souvent utile, prête à bondir (même chez l'adulte), exige par conséquent, lorsque c'est nécessaire comme dans la tâche de Piaget, un mécanisme plus puissant de résistance cognitive : l'inhibition par le Système 3 de l'heuristique « longueur égale nombre ».

On comprend dès lors mieux, selon les situations plus ou moins conflictuelles S1/S2 rencontrées par l'enfant au cours de son développement (par exemple, longueur/nombre-comptage), qu'il y ait des ratés, des accros, des décalages inattendus, des erreurs.

C'est en ces termes nouveaux d'un système dynamique et non linéaire que la conception même du développement de l'intelligence et des apprentissages cognitifs est aujourd'hui renouvelée, après Piaget, en sciences cognitives. Les notions d'heuristiques souvent dominantes dans le cerveau, d'algorithmes exacts (la logique, les règles, les programmes scolaires) et de contrôle inhibiteur permettent de lever le paradoxe entre des capacités cognitives précoces chez les bébés ou les jeunes enfants et des erreurs tardives des adolescents et même des adultes confrontés, selon le contexte, à des heuristiques qu'ils ne parviennent pas à inhiber. Voilà un processus inhibiteur (positif, adaptatif, voir la figure 6) sur lequel devraient se concentrer les apprentissages à l'école pour rendre le cerveau humain plus robuste, plus résistant, face aux situations nouvelles, quelquefois trompeuses.

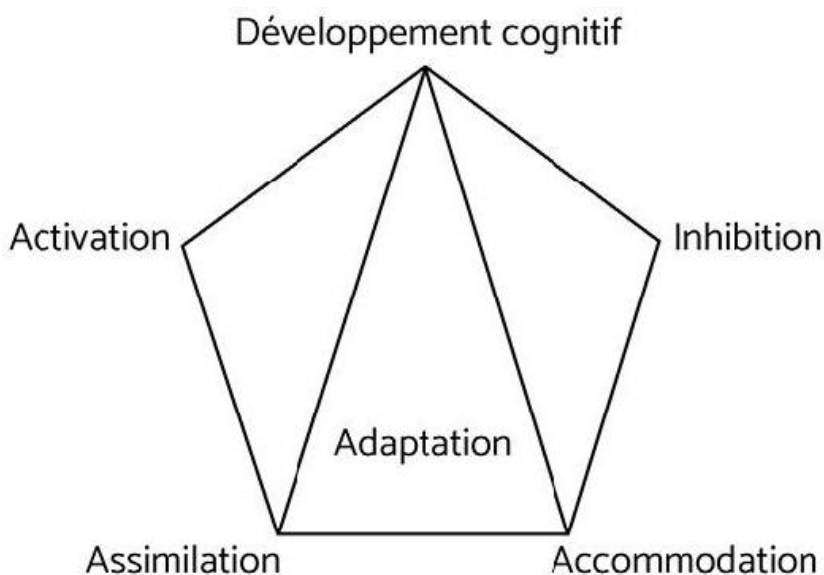


Figure 6 – La double dynamique de l'adaptation dans le développement cognitif :
l'assimilation/accommodation (reprise de Piaget), complétée et renforcée aujourd'hui par
l'inhibition cognitive (pôle accommodateur), antagoniste de l'activation (pôle assimilateur)
(O. Houdé).

Les grands principes d'apprentissage du cerveau humain

Dans son cours du Collège de France consacré aux fondements cognitifs des apprentissages scolaires, Stanislas Dehaene a dégagé quatre grands principes :

1. l'éducation, la plasticité et le recyclage neuronal ;
2. l'attention et le contrôle exécutif ;
3. l'engagement actif, la curiosité et la correction d'erreurs ;
4. la consolidation des apprentissages et l'importance du sommeil pour l'optimisation de la mémoire.

Nous renvoyons le lecteur au lien de ce cours sur lequel il trouvera toute la documentation utile (diapositives et références)³. Le point sur l'attention et le contrôle exécutif a déjà été abordé juste avant *via* le rôle du contrôle attentionnel inhibiteur (dans l'exécution des stratégies, des actions et réponses) ; nous y reviendrons à la fin en lien avec les apprentissages scolaires et l'automatisation.

L'éducation, la plasticité et le recyclage neuronal

L'hypothèse du recyclage neuronal est particulièrement intéressante, notamment pour l'apprentissage de la lecture. Il s'agit d'une forme de plasticité du cerveau provoquée par l'éducation. Dehaene (2007) a ainsi découvert, grâce à l'IRM fonctionnelle, que l'apprentissage de la lecture est rendu possible *via* une région occipito-temporale gauche du cerveau, dite « aire de la forme visuelle des lettres et des mots » (ou « boîte aux lettres » du cerveau), initialement spécialisée dans la reconnaissance des objets. Il s'agit d'une région spécifique de la voie visuelle dite « ventrale » ou occipito-temporale que nous avons aussi confirmée dans une méta-analyse d'IRMf de la lecture portant sur plusieurs centaines d'enfants des écoles de différents pays (Houdé *et al.*, 2010)⁴.

Selon Dehaene, dans l'histoire de l'humanité, avant l'apparition

de l'écriture et de la lecture, comme au début du développement de l'enfant (avant 5-6 ans), les neurones de cette région étaient d'abord dédiés exclusivement à la reconnaissance visuelle des objets (domaine 1), puis sous l'effet de l'éducation, de l'école notamment, et de la pratique intense de la lecture, ces mêmes neurones se sont recyclés pour identifier les lettres et les mots de la langue de l'enfant (domaine 2). Ce serait l'un des plus élégants phénomènes de plasticité cérébrale provoqué par un apprentissage culturel (Dehaene, 2008).

Changeux précise toutefois, à ce sujet, qu'il suffit de se référer, plutôt qu'au recyclage, à « l'épigenèse synaptique » (Changeux, 2012, 2017), c'est-à-dire à la stabilisation et à la sélection des contacts entre neurones après la naissance – phénomène biologique qui d'ailleurs intéressait beaucoup Piaget (voir le débat avec Chomsky dans les années soixante-dix, auquel a participé Changeux ; Piatelli-Palmarini, 1979). Changeux rappelle ici que, pendant l'apprentissage de la lecture et de l'écriture chez l'enfant, le rythme de formation des synapses (contacts entre neurones) est de l'ordre de 10 millions par seconde ! Ce serait donc, par ces contacts foisonnants, une nouvelle empreinte neuronale, un « circuit neuro-culturel » inédit qui se formerait lors de l'apprentissage de l'écriture et de la lecture (Changeux, 2007), plutôt qu'un réel recyclage des neurones eux-mêmes.

L'idée d'une telle empreinte culturelle nouvelle dans le cerveau humain avait déjà été avancée, concernant l'écriture, par le neurologue Jules Dejerine en 1902, et démontrée pour la première fois en imagerie cérébrale chez l'adulte, à propos de la lecture, un siècle plus tard (Castro-Caldas *et al.*, 1998). Quoi qu'il en soit, empreinte nouvelle (Dejerine, Changeux) ou recyclage neuronal (Dehaene), la lecture provoque, de façon certaine, la signature d'un apprentissage culturel intense, en l'occurrence scolaire, dans le cerveau.

En outre, toutes les études de sciences cognitives de la lecture, résumées dans l'ouvrage collectif *Apprendre à lire : des sciences cognitives à la classe* (Dehaene *et al.*, 2011), confirment l'importance de l'apprentissage systématique des relations entre les lettres et les sons, dans un circuit du cerveau dédié aux Correspondances Grapho-Phonologiques (CGP). C'est le meilleur prédicteur de l'expertise

ultérieure en lecture. On sait aujourd'hui que les dyslexies, touchant 5 % de la population environ, sont le plus souvent provoquées par un trouble phonologique d'origine génético-biologique (Gabrieli, 2009). Pour ces raisons, Dehaene privilégie, à l'école, les méthodes de lecture phonémiques ou syllabiques, en adéquation avec les mécanismes fins de décodage du cerveau – en complément, bien entendu, du sens des mots et des phrases (Bentolila, 2017) – et condamne fermement (contre Decroly, Freinet et Foucambert) l'usage des méthodes fondées sur la seule forme globale du mot. Le cerveau a besoin de plus de précisions ! Les sciences cognitives confirment aussi l'importance du geste d'écriture : tracer chaque lettre du mot au tableau, sur une ardoise ou sur une feuille (voire sur une tablette tactile), tout en l'épelant renforce son organisation spatiale et temporelle. Montessori l'avait bien pressenti avec ses lettres rugueuses alliant les formes alphabétiques à leur exploration tactile fine.

L'engagement actif : curiosité, retour d'information, émotion et correction d'erreurs

Une méta-analyse internationale réalisée sur 225 études a démontré scientifiquement que les élèves engagés dans des activités scolaires réelles réussissent mieux aux examens que les élèves qui ont reçu un enseignement magistral (Freeman *et al.*, 2014). Lorsqu'il est actif, l'enfant ou l'adulte effectue des prédictions, réfléchit à une réponse, l'anticipe avant qu'elle ne lui soit apportée. Ainsi, les situations où l'élève est surpris par une réponse ou un résultat qu'il n'attendait pas favorisent les apprentissages. En outre, lorsqu'il ressent un défi personnel, une émotion, il parvient plus facilement à inhiber ses automatismes (heuristiques) qui l'induisent en erreur (Houdé *et al.*, 2001, pour une démonstration en imagerie cérébrale). L'action, le tâtonnement et les émotions jouent donc des rôles importants dans les apprentissages.

Freeman et ses collaborateurs montrent ainsi que les situations dans lesquelles l'élève intervient de manière active, comme les exposés ou les sessions de travail en groupe, et qui comportent un défi, aident à mieux apprendre. La récompense (feed-back,

renforcement positif), par une remarque qui encourage, une approbation, favorise, dans ce cas, la curiosité et la motivation. On sait, en outre, que l'enseignement trop explicite tue la curiosité (Bonawitz *et al.*, 2011). Cette curiosité des élèves, précieuse pour la neuropédagogie, est aussi spécifiquement démontrée et validée en imagerie cérébrale (Kang *et al.*, 2009), ainsi que chez les bébés comme l'un des tout premiers moteurs de l'apprentissage humain à partir de la surprise et de la violation des attentes (Stahl & Feigenson, 2015) – dans *La psychologie des sentiments* (1896), Ribot ne disait-il pas que la surprise chez le bébé est la première forme de sentiment intellectuel ? (voir aussi Loewenstein, 1994).

Tant Montessori que Freinet et Decroly (mais aussi Skinner) sont ici confortés par les sciences cognitives, de même que le programme pédagogique de la fondation La Main à la Pâte de l'Académie des sciences en France (LAMAP), initié par le Prix Nobel de Physique Georges Charpak en 1995, qui préconise l'action et l'expérimentation avec essais et erreurs, associées au raisonnement curieux de l'élève (seul ou en groupe), plutôt que l'enseignement magistral et explicite des notions scientifiques. Je conseille au lecteur de consulter le site de LAMAP pour les divers modules pédagogiques proposés par cette fondation⁵.

Selon la théorie actuelle du cerveau dit « bayésien » ou statisticien (Tenenbaum *et al.*, 2011)⁶, le mécanisme fondamental qui nous permet d'apprendre à partir d'un modèle cognitif interne initial est le calcul de différence entre la récompense attendue ou espérée par l'élève (par exemple, penser avoir répondu correctement à une question en classe) et celle effectivement reçue (la réponse était fausse ou pas assez précise). Cette différence est appelée le signal d'erreur (Schultz *et al.*, 1997, 2016 ; Waelti *et al.*, 2001). Il est préférable, pour que l'enfant apprenne bien à l'école, que la tâche ne soit ni trop facile (pas d'erreur) ni trop difficile (trop d'erreurs et pas assez de réussite pour ancrer la curiosité et le progrès, voir Gottlieb *et al.*, 2013 ; Kaplan & Oudeyer, 2007, pour une simulation en robotique développementale). Rappelons-nous Montessori : proposer aux enfants des tâches un peu difficiles, sans qu'elles n'excèdent trop leurs possibilités ! Nous ajustons ainsi en permanence nos représentations

du monde extérieur selon ce signal d'erreur.

Dans la pratique de la classe, il vient de l'environnement et de l'enseignant. S'il est régulier, ciblé et finement ajusté, avec bienveillance émotionnelle et sociale, l'élève mobilisera des circuits dopaminergiques (circuits dits « de la récompense », Changeux, 2002 ; Wise, 2004) de son cerveau dont on sait aujourd'hui qu'ils sont directement corrélés aux signaux d'erreur (Gruber *et al.*, 2014 ; Schultz, 2016). Et il ne s'agit pas ici nécessairement de bonbons ou de bons points ; cela peut-être un sourire, un simple ajustement ou encore une récompense cognitive qui satisfait, dans un petit ou grand projet pédagogique, la curiosité et le désir d'apprendre de l'élève – de chaque élève !

C'est aussi le principe du neurofeedback. Avec la révolution numérique, nous sommes entrés de plain-pied dans le monde de l'hyper-connexion maîtrisée et du biofeedback, c'est-à-dire du retour individualisé d'information sur l'activité de notre corps, y compris ses indicateurs physiologiques : distance parcourue lors d'un footing ou d'une marche, progression quotidienne en pourcentages, nombre de pas effectués, calories brûlées, fréquence cardiaque, etc. Mais notre corps comporte aussi un cerveau conscient, doté de capacités d'apprentissage cognitif, et dont l'activité est aujourd'hui observable par l'imagerie cérébrale ! On peut dès lors s'immiscer plus loin, dans le domaine plus précis du neurofeedback : la régulation en temps réel de l'activité de notre propre cerveau. Le journal *Nature Reviews Neuroscience* y a récemment consacré une revue de synthèse très complète (Sitaram *et al.*, 2017).

Je préviens et rassure sans tarder le lecteur : tant comme scientifique que comme ancien instituteur, je suis opposé, pour l'école, au mythe dérisoire de la performance exceptionnelle à tout prix, de même qu'à une vision – je l'ai déjà dit – trop scientifique et naïve d'une technoscience de l'éducation parfaitement contrôlée et contrôlable. Toutefois, cela n'exclut pas d'examiner ici ce que cette nouvelle technologie nous apporte dans la manière de concevoir les attentes, souvent négligées, du cerveau des élèves.

Le principe, pour les enfants, est d'être informés de l'activité

d'une région précise de leur cerveau, dite « région d'intérêt », ou de la connectivité de deux régions proches ou distantes au moment même où ils exécutent une tâche cognitive. La mesure de cette activité est réalisée par imagerie cérébrale. Les possibilités sont multiples : électro-encéphalographie (EEG), magnétoencéphalographie (MEG), imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) ou imagerie optique (spectroscopie proche infrarouge fonctionnelle ou SPIRf). Lorsque le signal cérébral est obtenu, des algorithmes informatiques le transforment en retour d'information (feed-back) vers le sujet de l'expérience, sous la forme d'une image à l'écran, d'un signal sonore ou tactile.

Les premières applications ont été cliniques. Elles concernaient, par exemple, les enfants rencontrant des troubles des apprentissages liés à un déficit d'attention et d'hyperactivité (Chabot *et al.*, 2001 ; Dunstan *et al.*, 1999 ; Lubar *et al.*, 1984 ; Poil *et al.*, 2014). Dans ce cas, le neurofeedback obtenu sur des régions cérébrales du contrôle attentionnel était une voie alternative aux traitements pharmacologiques ; il permettait de diminuer l'impulsivité et d'améliorer la concentration. Cette technologie serait sans doute aussi intéressante pour tester en laboratoire des modèles expérimentaux d'apprentissage, sur l'entraînement du contrôle exécutif du cortex préfrontal par exemple, lorsqu'il s'agit d'inciter un enfant à ne pas donner des réponses fausses trop hâtives (la capacité d'inhibition cognitive des heuristiques) ou à adapter son mode de raisonnement à la situation rencontrée (capacité de flexibilité mentale).

S'agit-il pour autant, à l'école, d'équiper tous les enfants de systèmes de neurofeedback ? Ce n'est ni envisageable ni sans doute souhaitable, comme en a alerté en France le Conseil consultatif national d'éthique. Mais que nous apprend néanmoins cette technologie d'apprentissage pour l'école ? Que l'engagement actif de l'élève et le retour rapide et continu d'informations (feed-back) sur ses performances sont essentiels à toute bonne pédagogie ou remédiation. Depuis les théories behavioristes fondatrices des sciences de l'apprentissage (Skinner et son conditionnement opérant, complétant le conditionnement dit « répondant » de Pavlov), ce message n'a fait que s'affiner, en intégrant à présent la cognition et le cerveau, alors

que les behavioristes n'y voyaient souvent qu'une « boîte noire ».

On ne peut donc qu'inciter les professeurs, dans le contexte social et réel de la classe, à inventer des pratiques pédagogiques qui simulent au plus près cet effet de neurofeedback, de prise de conscience ou regard sur soi : il faudrait, par exemple, commencer par expliquer aux élèves comment fonctionne et réagit le cerveau humain, en contexte d'apprentissage, à partir des données d'imagerie cérébrale (il en existe maintenant chez l'enfant) ; adapter pour chacun d'eux ou en petits groupes, en coopération même, un programme d'apprentissage qui leur permette de mesurer, en chaque matière, des signaux réguliers et progressifs d'erreur et de s'autoréguler (on retrouve tant Freinet que Skinner). Sans revenir au préceptorat, les jeux numériques éducatifs et les robots pédagogiques, adaptés en parallèle au rythme de chaque élève en classe, peuvent y aider aujourd'hui – car le professeur ne peut évidemment tout faire seul face à une classe trop nombreuse. Enfin, l'engagement actif, la curiosité, le retour d'information (feed-back simple ou neurofeedback) et la correction d'erreurs sont essentiels parce qu'ils éveillent l'émotion dans le cerveau des élèves.

Sur cette question des émotions, les neurosciences ont également apporté des analyses d'une précision inégalée, notamment les travaux du neurologue Damasio, déjà cité. Il existe dans le cerveau humain des circuits bien identifiés dont la fonction est le guidage émotionnel de l'apprentissage et de la prise de décision. Plus précisément, il existe dans le cortex dit « paralimbique », c'est-à-dire autour du système limbique (cortex des émotions telles la joie, le plaisir ou la peur), une région à l'avant (préfrontal), en bas (ventro) et au milieu (médian) du cerveau, appelée le cortex préfrontal ventromédian. Cette région, analysée par Damasio (1995, 1999, 2017), nous permet d'attribuer des poids différents, de valence positive ou négative, aux diverses solutions qui s'offrent à nous, de sorte que le paysage cérébral dans lequel s'opèrent nos apprentissages par essais et erreurs comporte toujours un relief émotionnel.

Damasio a démontré scientifiquement comment ce relief dépend de nos « marqueurs somatiques », c'est-à-dire des connexions établies entre certaines catégories d'objets ou d'événements et des états du corps plaisants ou déplaisants (liés au circuit dopaminergique de la

récompense dans le cerveau). Ces marqueurs sont issus de multiples expériences individuelles durant l'enfance, notamment à l'école, régulées par le système biologique d'homéostasie (maintien de notre équilibre interne pour la survie de l'organisme). Damasio a publié de remarquables illustrations de cette homéostasie intégrée dans tout le corps : chimie, viscères, système musculo-squelettique et portails sensoriels. Il y décrit le maintien subtil de l'équilibre biologique à tous les niveaux, de la température du corps et de la concentration des substances chimiques à la cognition de haut niveau, *via* le cortex cérébral (Damasio & Carvalho, 2013). On y comprend dans les détails du corps humain, avec de multiples schémas anatomiques à l'appui, comment, depuis les neurones individuels et leur environnement chimique, jusqu'aux réseaux corticaux, s'opère l'ancrage profond des apprentissages cognitifs dans les sentiments, les émotions et la biologie (voir aussi Damasio, 2017, sur la vie, les sentiments et la fabrique de la culture). En inversant la formule de Bruner (2015), c'est ici le corps qui donne forme à l'esprit et à la culture.

Il ne fait plus de doute aujourd'hui, au regard des travaux de Damasio, que l'émotion, individuelle ou collective, de préférence positive (la peur étant néfaste à l'apprentissage ; Allen & Monyer, 2013 ; Donato *et al.*, 2013, déjà cités avec Skinner), liée à l'engagement actif, à la curiosité, au retour d'information et à la correction d'erreurs, est un très bon guide de l'intelligence dans le cerveau. Les professeurs ne doivent donc pas seulement enseigner les mathématiques, le français, l'histoire, la géographie, mais aussi être des « professeurs (ou incitateurs) d'émotions », au sens de leur éveil constant chez les enfants lors des apprentissages scolaires. C'est ce que, dans le monde de l'éducation, on appelle d'un terme générique la « motivation ». Tant les neurosciences affectives, sous l'impulsion de Damasio, que l'éducation nouvelle depuis un siècle invitent à ce que l'émotion soit au centre de la classe et des apprentissages car elle est au centre du cerveau et du corps. L'homéostasie, au sens de Damasio (du corps à l'esprit), n'est pas seulement un concept de biologie, mais aussi un concept à apprendre – et à ne jamais oublier – en sciences de l'éducation et dans la formation des professeurs des écoles.

Outre l'équilibre individuel (homéostasie, émotion et motivation

propres), une recherche neuroscientifique récente montre combien l'engagement collectif synchrone et motivé des cerveaux des élèves est aussi important à l'équilibre de la classe (Dikker *et al.*, 2017). Les chercheurs ont suivi les performances des élèves d'une classe de lycée lors de l'enseignement du professeur de biologie, durant un semestre entier. Ils enregistraient simultanément l'activité cérébrale de tous les jeunes grâce à des appareils d'électro-encéphalographie (EEG) portables. Les élèves ont aussi dû évaluer par une notation la pédagogie de leur professeur et leur niveau de concentration en cours. De manière à mesurer également la dynamique sociale du groupe, les chercheurs ont demandé aux élèves, *via* un sociogramme, comment ils appréciaient les autres élèves de la classe et le travail de groupe. Les résultats ont révélé que plus les élèves appréciaient le cours et la pédagogie de leur professeur, plus leurs activités cérébrales étaient synchrones, c'est-à-dire mobilisant les mêmes ondes au même moment. Donc, un bon prof, emportant l'adhésion des élèves, est un véritable chef d'orchestre neuronal ! De plus, deux autres facteurs étaient associés à une meilleure synchronisation des cerveaux : être ami ou proche d'un élève (à condition d'avoir interagi avec lui pendant la classe ou juste avant) et accorder de l'importance aux activités de groupe. Cette étude est la toute première à mesurer l'EEG d'un groupe d'élèves en conditions réelles et à démontrer une synchronisation de leurs cerveaux dans la réalité pédagogique de la classe, pour une résonance cognitive (un cours de biologie). Les neurosciences sociales contemporaines confirment ainsi l'intuition tant de Socrate que de Freinet (en passant par Montaigne) quant aux vertus pédagogiques du travail de groupe.

Mais être créatifs, bien raisonner, c'est parfois aussi penser autrement, contre les autres, sortir du conformisme social. C'est ce que j'appelle la résistance cognitive par le processus d'inhibition du cortex préfrontal : le recul, l'esprit critique (Houdé, 2017b). Dans ce cas, il faudrait inventer un calcul de désynchronisation neuronale. Déjà Montaigne aimait les petits groupes, mais craignait les « ondées des foules »...

La mémoire et la consolidation : espacement des

apprentissages et rôle du sommeil

Un autre exemple de principe pédagogique efficace, validé par les sciences cognitives, pour aider les élèves à apprendre est de bien espacer les périodes d'apprentissage (Callan & Schweighofer, 2010 ; Cepeda *et al.*, 2008 ; Kang *et al.*, 2014 ; Kornell, 2009 ; Rohrer & Taylor, 2006 ; pour une synthèse en français, voir Masson, 2016). Si, par exemple, on consacre quatre heures à un enseignement donné en une même journée, on remarque que le niveau d'apprentissage des élèves augmente, bien entendu, mais diminue ensuite rapidement jour après jour. Cet oubli s'explique par le fait que les neurones en lien avec l'apprentissage cessent de s'activer ensemble, leurs connexions s'affaiblissent et peuvent même se défaire. Si au lieu d'être regroupées, ces quatre mêmes heures sont étalées sur plusieurs jours de la semaine, le niveau final des élèves, dans la même matière, est nettement plus élevé et l'oubli est moindre. Cet espacement optimise la mémoire (voir Cepeda *et al.*, 2008, pour les lois d'une bonne rétention) et l'effet positif qu'il produit est démontré en imagerie cérébrale (Bradley *et al.*, 2015 ; Callan & Schweighofer, 2010). Du point de vue du cerveau, l'une des explications tient au rôle important du sommeil dans la consolidation des apprentissages (Antony *et al.*, 2012). Inconsciemment, lorsque nous dormons, les réseaux de neurones liés aux apprentissages cognitifs de la journée se réactivent et renforcent leurs interconnexions, d'où un gain neuronal cumulatif pour des périodes pédagogiques espacées.

Le sommeil (les besoins des enfants sont estimés à 10 heures par nuit), ainsi que la sieste à l'école, sont essentiels à la mémoire (Diekelmann & Born, 2010 ; Peigneux *et al.*, 2004, notamment). Il consolide et réorganise les souvenirs récents dans le cerveau. En outre, un bon sommeil durant la nuit améliore, le lendemain, la découverte de solutions difficiles ou astucieuses à des exercices cognitifs posés la veille, en particulier chez les enfants (Wagner *et al.*, 2004 ; Wilhelm *et al.*, 2013). À l'école, les siestes chez les petits, comme dans les classes Montessori et beaucoup d'écoles maternelles aujourd'hui, permettent de consolider, au cours de la journée, les traces mnésiques (c'est à présent démontré expérimentalement : Kurdziel *et al.*, 2013). Pourquoi, dès lors, ne pas poursuivre le principe pédagogique de la

sieste plus tard dans la scolarité ?

Dans le domaine de la mémoire (Eustache & Desgranges, 2012 ; Eustache & Guillery-Girard, 2016), l'imagerie cérébrale a révélé de multiples systèmes en interaction : (i) *une mémoire de travail*, à court terme, sous-tendue principalement par le cortex préfrontal pour la manipulation des informations et les fonctions exécutives (contrôle attentionnel, inhibition des distracteurs, etc.) et dans des aires corticales postérieures, proches des régions sensorielles pour le maintien passif des informations ; (ii) *une mémoire procédurale* (liée à l'action) située dans des réseaux sous-corticaux et le cervelet ; (iii) *une mémoire perceptive* dans des réseaux neuronaux de régions corticales très différentes selon les modalités sensorielles (par exemple, le cortex occipital pour la mémoire perceptive visuelle) ; (iv) *une mémoire sémantique* (connaissances générales, déclaratives), très distribuée aussi dans le cerveau, notamment dans le lobe temporal ; (v) *une mémoire épisodique* (souvenirs plus personnels des événements ou épisodes particuliers vécus) située dans une région appelée l'hippocampe et plus généralement sur la face interne du lobe temporal, en lien avec les souvenirs émotionnels (dans une région appelée l'amygdale).

Selon cette conception « multi-système » de la mémoire humaine – dite « Modèle néostructural intersystémique » (Eustache & Desgranges, 2012) –, les modifications provoquées par la mémorisation à l'école surviennent à la fois au niveau des synapses, ou jonctions entre les neurones (Kandel, 2006) et au niveau de ces grands ensembles neuronaux multi-localisés. À cet égard, les neuropsychologues formulent des conseils précis pour la neuroéducation. Ainsi, Eustache & Guillery-Girard (2016) préconisent des stratégies de mémorisation pour améliorer l'encodage (entrée) et la récupération (sortie) des informations à l'école :

- vérifier au préalable l'état affectif de l'enfant, ses éventuelles préoccupations du moment et sa disponibilité attentionnelle à apprendre et à mémoriser (on retrouve ici la sécurité affective de l'enfant préconisée par Decroly) ;
- multiplier les modalités perceptives de présentation (visuelle, verbale, tactile, etc.) d'une même notion pour rendre son

souvenir plus robuste lors de la récupération (Montessori l'avait pressenti pour l'alphabet avec ses lettres rugueuses) ;

- enrichir l'encodage par une réalisation sensorimotrice qui incarne le souvenir dans une action, un geste (ou éraction ; on retrouve Montessori, Freinet, Piaget et Skinner) ;
- associer des émotions positives lors de l'encodage (Damasio) ;
- créer des liens avec d'autres connaissances générales pour « accrocher » le souvenir dans un arbre (ou réseau) sémantique ;
- associer aussi l'information à retenir avec des connaissances plus personnelles, « épisodiques », de l'enfant.

En outre, les auteurs préconisent des stratégies d'organisation du matériel à mémoriser en structurant le document afin de faire une synthèse des éléments essentiels (classement, catégorisation) : création de plans, tableaux, frises ou schémas (cartes mentales : organigramme ou arborescence sémantique d'un concept). Mais, pour que le souvenir s'ancre dans le cerveau, il faut aussi de la répétition, plutôt de façon distribuée (en fractionnant les épisodes de mémorisation) que massée sur une trop longue séance (risque de fatigue, de saturation de la mémoire de travail et d'interférences accrues). Cela a été évoqué plus haut pour l'espacement des périodes d'apprentissage. Toutefois, dans certains apprentissages dits « procéduraux », comme apprendre à faire du vélo ou de la musique par exemple, l'automatisation exige que la mémoire soit entraînée à la fois de façon massée (dans une séance intense) et distribuée (multiplication des séances).

Eustache et Guillery-Girard (2016) donnent, enfin, des clés pour l'autonomisation des élèves : apprendre à mémoriser seul à la fin de l'école élémentaire. C'est le domaine de la métacognition, en l'occurrence la métamémoire, qui est la capacité des élèves à analyser eux-mêmes le fonctionnement de leur mémoire : ses forces et ses faiblesses. Ils découvrent ainsi les conditions qui leur seront les plus adaptées : lecture silencieuse, lecture à haute voix, copie, schéma, etc. Ces métaconnaissances se construisent jusqu'à la fin de l'adolescence. Elles s'acquièrent par l'expérience des situations de mémorisation, les interactions sociales et le feed-back des enseignants lors de tests. La mémorisation est d'ailleurs optimale lorsque l'élève est testé de façon répétée et alternée – ce nombre de tests étant une variable plus

importante que le temps d'étude lui-même (Karpicke & Roediger, 2008).

Pour préciser l'aspect social de la métamémoire, Eustache et Guillery-Girard font appel à la zone proximale de développement de Vygotski dans laquelle l'enseignant doit ici expliciter à l'élève (i) la façon dont il doit lui-même analyser la situation de mémorisation, tenant compte de la tâche, (ii) la gestion de son temps, (iii) le type de représentation privilégié, (iv) les situations d'échec, etc.

Dans le cerveau, le développement de cette métamémoire s'appuie sur la maturation des autres systèmes de mémoire (de travail, procédurale, perceptive, sémantique et épisodique). Ainsi, la métamémoire est l'ensemble des connaissances dont l'individu dispose, par conscience réflexive (seul et en interactions sociales), concernant ses processus cognitifs et mnésiques. La neuropédagogie permet aujourd'hui d'y insérer les connaissances plus précises sur la façon dont le cerveau mémorise à l'aide de ses systèmes spécifiques. Eustache a rédigé, dans cet esprit, un livre jeunesse aux éditions Le Pommier (collection Minipommes) : *Les petites cases de ma mémoire* (2013).

L'automatisation et le contrôle inhibiteur dans les apprentissages scolaires

L'imagerie cérébrale a permis de démontrer l'existence, chez l'enfant comme chez l'adulte, de deux formes complémentaires d'apprentissage neurocognitif : l'automatisation par la pratique (la répétition) et le contrôle par l'inhibition. Les deux opèrent en sens inverse dans le cerveau, selon une remarquable symétrie.

Automatisation

Dans le cas de l'automatisation, c'est initialement la partie préfrontale (avant) du cerveau qui est activée, car la mise en place des habiletés nécessite un contrôle et un effort cognitif (apprendre et répéter par cœur une liste de mots, par exemple), puis ces habiletés

s'automatisent avec l'apprentissage et c'est la partie postérieure du cerveau, ainsi que les régions sous-corticales, qui prennent le relais. L'automatisme se cristallise. Ce fut la toute première démonstration des effets d'apprentissage, par la pratique, en imagerie cérébrale grâce à la technique de la TEP chez de jeunes adultes (Raichle *et al.*, 1994 ; outre cet apprentissage verbal, voir aussi Sakai *et al.*, 1998, pour un résultat similaire sur un apprentissage visuomoteur).

Désautomatisation par l'inhibition active

Dans le cas inverse (désautomatisation), il s'agit d'apprendre à inhiber les automatismes acquis pour changer de stratégie cognitive.

L'imagerie cérébrale, toujours avec la technique de la TEP, a permis de démontrer le changement qui se produit dans le cerveau des élèves lorsque, sous l'effet d'un apprentissage du contrôle inhibiteur réalisé avec un professeur, ils passent, au cours d'une même tâche de raisonnement, d'un mode perceptif facile, automatisé mais erroné (une heuristique), à un mode logique difficile et exact (un algorithme) qui requiert toute leur attention et leur effort (Houdé *et al.*, 2000 ; Houdé & Tzourio-Mazoyer, 2003). L'apprentissage expérimental réalisé en laboratoire, dans cette étude, correspondait exactement au principe de la zone proximale de développement de Vygotski (ou de Bruner) : une interaction de tutelle élève-professeur à propos d'une tâche de raisonnement logique.

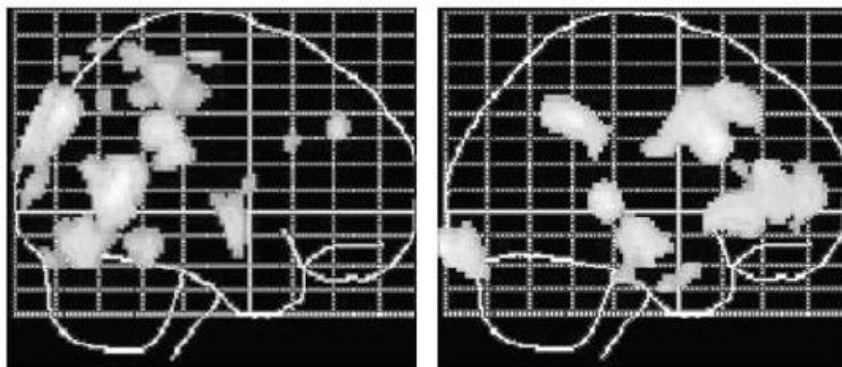


Figure 7 – Exemple de neuropédagogie : Observation de ce qui se passe dans le cerveau d'un élève lors d'une tâche de logique, avant (à gauche) et après (à droite) un apprentissage de l'inhibition d'une erreur initiale de raisonnement, réalisé en interaction sociale avec un

Les résultats ont indiqué un basculement très net des activations cérébrales, de la partie postérieure du cerveau au cortex préfrontal – dynamique cérébrale inverse de l'automatisation (voir la figure 7). De façon paramétrique, il a ensuite été démontré, lors d'une réplification de cette expérience, que plus la règle logique exige d'inhiber le biais perceptif, plus l'activation préfrontale est grande (Prado & Noveck, 2007). Cette situation correspond au cas où les élèves doivent penser, prendre du recul par rapport à ce qu'ils perçoivent. Tels les prisonniers libérés de la caverne de Platon, les élèves découvrent, avec effort, la logique de la tâche, c'est-à-dire l'algorithme exact (le Vrai) !

La dynamique ou « bascule » observée (plasticité et reconfiguration neuronales) dans Houdé et collaborateurs (2000, étude complétée par Houdé *et al.*, 2001) impliquait aussi des régions de la face interne du cerveau (le cortex préfrontal ventromédian) dédiées aux émotions et sentiments que procure le plaisir de découvrir la solution du problème et de corriger son erreur (Damasio, 1999, 2017).

Le premier type d'apprentissage (l'automatisation par la pratique ; Raichle *et al.*, 1994 ; Sakai *et al.*, 1998) correspond aux connaissances, sémantiques (verbales) ou procédurales (motrices), bien établies, apprises par la répétition, la mémorisation par cœur, et qui doivent être connues de tous, comme les programmes à l'école, par exemple. À l'inverse et complémentairement, le second type d'apprentissage (le contrôle par l'inhibition) fait appel à l'imagination (Harris, 2007), à la capacité à changer de stratégie de raisonnement en inhibant les automatismes habituels. C'est « apprendre à résister » (Houdé, 2017b) !

À l'école, depuis toujours, on apprend surtout par la répétition (voir le point précédent sur la mémoire), la pratique et l'automatisation. C'est très bien mais, comme on vient de le voir, le cerveau des élèves doit aussi apprendre à raisonner par le schéma inverse : inhiber ses automatismes ou heuristiques (le Système 1), « sortir du cadre » pour aller vers une autre solution (Système 2), grâce au Système 3 et au cortex préfrontal (voir la section « Un

développement dynamique et non linéaire»). Ce dernier système permet la flexibilité cognitive et la vicariance (Berthoz, 2013), terme qui signifie, dans ce cas, la capacité à explorer un autre chemin de pensée.

Il serait donc très utile de développer à l'école une pédagogie du cortex préfrontal, notamment l'exercice de la capacité d'inhibition et de vicariance du cerveau (souvenez-vous de l'exemple de l'heuristique « les éléphants sont lourds » dans le domaine sémantique ou « longueur = nombre » dans le domaine spatial). L'inhibition est, en effet, une forme de contrôle attentionnel et comportemental qui permet aux enfants de résister aux habitudes ou automatismes, aux tentations, distractions ou interférences, et de s'adapter aux situations complexes par la flexibilité (voir aussi, plus loin, Lachaux, 2011, 2016, pour l'entraînement de l'attention face aux distractions internes et/ou externes). C'est un signe d'intelligence. Le défaut d'inhibition peut expliquer des difficultés d'apprentissage (erreurs, biais de raisonnement, etc.) et d'adaptation tant cognitive que sociale.

Les professeurs des écoles avec lesquels nous travaillons depuis plusieurs années dans des groupes de formation-action (GFA) ont compris, tout comme Céline Alvarez dans sa classe maternelle Montessori à Gennevilliers en région parisienne (*Les lois naturelles de l'enfant*, 2016), que des petits jeux classiques tels que « 1, 2, 3 soleil », « Jacques a dit » ou « Ni oui ni non » sont de très bons moyens d'exercer très tôt le contrôle inhibiteur des enfants (en l'occurrence, inhiber momentanément sa course après le mot « soleil », inhiber ses actions quand l'ordre ne commence pas par « Jacques a dit », ou encore inhiber ses réponses « oui » et « non »). Ce sont des jeux utiles et sérieux pour le cerveau, en particulier pour le cortex préfrontal, dont on peut espérer des bénéfices pédagogiques (voir Zhao *et al.*, 2015). Il y a également l'inhibition totale tel le « Jeu de la statue » (ne plus bouger du tout), ou le calme et le silence qui s'apparentent aux nouvelles approches dites méditatives de « pleine conscience » pour les enfants (voir *Calme et attentif comme une grenouille* d'Eline Snel, préfacé par Christophe André, 2012 ; *Un cœur tranquille et sage*, Greenland, 2014). L'effet bénéfique de la méditation, pour enfants ou adultes, sur le contrôle attentionnel et cognitif est aujourd'hui bien

étayé par des données de neurosciences expérimentales (Tang *et al.*, 2015).

Beaucoup d'autres jeux de société pour la famille reposent en fait sur ce principe d'inhibition. Dès que (i) le jeu, à l'école ou à la maison, met en place une règle pendant un certain temps (un geste particulier à faire, un critère de catégorisation à utiliser telle la forme ou la couleur d'objets à ranger, etc.) et qu'ensuite (ii) on change ou même on inverse la règle, alors la capacité de contrôle inhibiteur de l'enfant est directement sollicitée : inhiber une réponse préétablie (Système 1) pour en activer une nouvelle (Système 2). Cela entraîne sa flexibilité cognitive et comportementale (Système 3). Un test neuropsychologique pour adulte existe aussi sur le même principe : c'est le *Wisconsin Card Sorting Test* (WCST) ou test de tri de cartes (selon la forme, la couleur ou le nombre), appliqué auprès de patients atteints de lésions du cortex préfrontal. Il y a encore le test de Stroop (ne pas lire le mot rouge écrit en vert mais identifier sa couleur d'impression, le vert) ou encore le *Trail Making Test* (TMT : alterner rapidement, d'essai en essai, une suite numérique, 1, 2, 3, etc., et une suite alphabétique, A, B, C, etc. : 1, A, 2, B, 3, C, etc.). Autant de tests cognitifs de contrôle de soi dont des versions simplifiées ont été créées pour les enfants, dès l'école maternelle.

La tâche de Piaget en IRM fonctionnelle

À partir de la tâche des jetons de Piaget (la conservation du nombre, voir la section « Alfred Binet, Jean Piaget et Lev Vygotski : les psychologues de l'enfant »), nous avons pu démontrer expérimentalement, dans mon laboratoire (Houdé *et al.*, 2011, voir la figure 8), à la fois par la chronométrie mentale (mesure des temps de réaction en millisecondes) et par l'imagerie cérébrale (avec la technique de l'IRM fonctionnelle) que ce qui pose réellement problème aux enfants dans cette situation, avant l'âge ou stade de raison (7 ans), n'est pas l'invariance du nombre en tant que telle, déjà observée chez les bébés, mais l'intervention de leur cortex préfrontal (Système 3) pour inhiber l'heuristique « longueur = nombre » très renforcée par l'environnement préscolaire (Système 1). Celle-ci interfère, dans le cortex pariétal des enfants (au niveau du sillon

intrapariétal), avec l'algorithme exact de quantification (Système 2) tel que le comptage par exemple⁷.

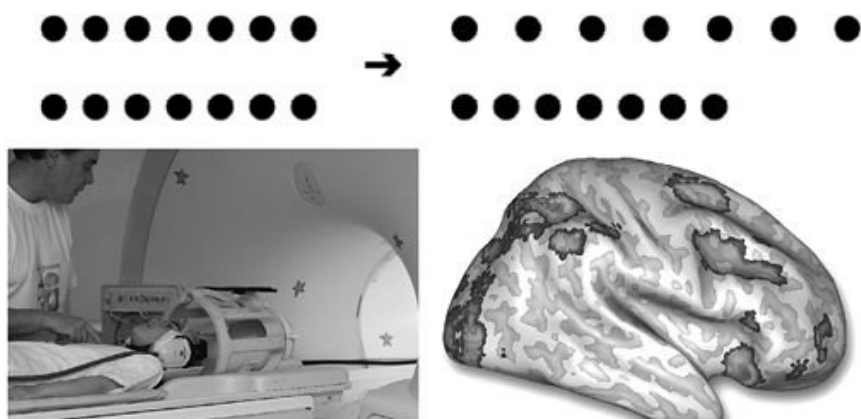


Figure 8 – Imagerie cérébrale des régions associées à la résolution de la tâche de conservation du nombre de Piaget (même nombre de jetons dans les deux rangées ?) par des enfants d'âge scolaire : régions postérieures pariétales (nombre/espace) et antérieures préfrontales (mémoire de travail, inhibition) observées en IRMf. D'après Houdé *et al.* (2011).

Le cortex pariétal est le siège des mathématiques, du sens du nombre chez le bébé aux calculs plus complexes chez l'enfant et l'adulte (Dehaene, 2010), en particulier le sillon intrapariétal, son épiceutre. Mais, dans ce dernier, des neurones dédiés aux nombres voisinent avec d'autres neurones dédiés à des dimensions spatiales non pertinentes (taille, longueur, position des objets, etc. ; Fias *et al.*, 2003 ; Pinel *et al.*, 2004) qui, dans certaines tâches, comme celle de Piaget, doivent précisément être inhibées. C'est le continu (longueur des alignements) qui interfère avec le discontinu (le nombre). On peut même faire l'hypothèse que c'est la proximité neuronale, le recouvrement (ou l'enchevêtrement) anatomique de ces dimensions pertinentes/non pertinentes dans le cortex pariétal, qui crée l'interférence cognitive. Mon laboratoire étudie cela, précisément, aujourd'hui.

Ce type de difficulté d'inhibition reste vrai chez les adolescents et les adultes pour d'autres tâches de logique où de nouvelles heuristiques perceptives et sémantiques surgissent en différents endroits du cerveau (heuristiques répertoriées dans Houdé, 2014 : biais de raisonnement déductif et inductif). Cela permet d'expliquer

les erreurs et biais systématiques de raisonnement, de jugement et de prise de décision observés par Kahneman (2012) et bien des difficultés d'apprentissage au cours de la scolarité !

Erreurs fréquentes en mathématiques, orthographe et lecture

Une erreur fréquente observée à l'école primaire concerne les problèmes dits « additifs » à énoncé verbal : « Louise a 25 billes. Elle a 5 billes de plus que Léo. Combien Léo a-t-il de billes ? » La bonne réponse (logique arithmétique, Système 2) est la soustraction $25 - 5 = 20$, mais souvent les enfants ne parviennent pas à inhiber (Système 3) l'heuristique d'addition déclenchée par le « plus que » dans l'énoncé (Système 1), d'où leur réponse erronée : $25 + 5 = 30$ (Lubin *et al.*, 2013). Les erreurs de ce type sont les ratés, les accros tardifs, du développement pourtant précoce du nombre chez l'enfant (système de suivi exact des petits nombres, système approximatif des grands nombres et intuition précoce des opérations arithmétiques, etc. : Dehaene, 2010, *La bosse des maths*, déjà cité, avec quelques conseils pour la dyscalculie, p. 326-331).

En orthographe, les enfants d'école élémentaire font fréquemment des fautes du type « Je les manges ». Ce n'est pas qu'ils ignorent la règle (logique orthographique, Système 2) selon laquelle il n'y a pas de « s » à la première personne du singulier dans les verbes du premier groupe (manger, trouver, etc.), mais ils sont incapables ici d'inhiber l'heuristique (Système 1) « après “les”, je mets un “s” » (Lanoë *et al.*, 2016). La tentation est trop grande pour eux, en raison de la proximité du terme « les » dans la phrase. L'enfant doit donc apprendre à inhiber (Système 3), grâce à son cortex préfrontal, cette réponse dominante et automatique, pour avoir la flexibilité d'appliquer une autre stratégie de son répertoire orthographique. On pourrait croire que cela ne concerne que les enfants. Mais combien d'emails ne reçoit-on pas de collègues ou amis qui écrivent « Je vous le direz » au lieu de « Je vous le dirai ». C'est exactement le même défaut d'inhibition frontale, réactualisé et renforcé par la rapidité de l'écriture électronique.

Un autre exemple concerne la lecture. L'alphabet est ici

l'algorithme exact du Système 2. Mais, les apprentis lecteurs, comme les lecteurs experts, doivent toujours éviter de confondre les lettres dont l'image en miroir constitue une autre lettre : par exemple, b/d ou p/q. Cette difficulté est renforcée par le fait que pour apprendre à lire, ainsi que nous l'avons vu plus haut, le cerveau humain recycle (selon Dehaene, 2007) des neurones initialement utilisés pour identifier visuellement les objets de l'environnement : les animaux par exemple. Or un animal est le même, quelle que soit son orientation par rapport à un axe de symétrie. Pour discriminer les lettres en miroir, notre cerveau doit donc apprendre à inhiber ce biais cognitif, intuitif (issu du Système 1). Nous avons ainsi démontré au laboratoire que les adultes (Borst *et al.*, 2015), comme les enfants (Ahr *et al.*, 2016), inconsciemment, doivent toujours résister (Système 3) à l'heuristique de généralisation en miroir. Au début de l'apprentissage de la lecture, pour éviter ces erreurs, il faudrait donc mettre les enfants en situations très explicites d'expériences métacognitives (ou de métalecture) à partir de séquences d'identification pareil/pas-pareil alternant des objets tels des animaux (où l'heuristique marche) et des lettres en miroir (où l'heuristique ne marche pas), pour qu'ils prennent conscience du biais cognitif que leur cerveau doit inhiber dans certains cas alphabétiques (b/d ou p/q). Complémentairement, le geste d'écriture peut aussi aider à briser (inhiber) la symétrie des lettres en miroir.

Apprendre à apprendre, c'est donc ici savoir, dans certains cas, inhiber ses automatismes cognitifs, ses heuristiques spontanées (voir le modèle de la figure 4). Au Canada (l'équipe d'Adele Diamond à Vancouver notamment), des expériences d'interventions pédagogiques pilotes de ce type ont été conduites avec succès dans les écoles pour exercer directement le « contrôle cognitif » des enfants (Diamond, 2016 ; Diamond *et al.*, 2007 ; Diamond & Lee, 2011 ; Diamond & Ling, 2016). Elles sont issues de la meilleure compréhension que nous avons des mécanismes d'apprentissage du cerveau tels l'inhibition cognitive et la flexibilité.

Entraîner l'inhibition positive, l'attention et la mémoire de travail

Le premier programme réalisé par Diamond et collaborateurs (2007) dans cet esprit visait à entraîner les fonctions exécutives (FE) du cerveau de l'enfant, déjà évoquées. Il s'agit des fonctions du cortex préfrontal, à l'avant du cerveau, qui contrôlent l'exécution des conduites, le choix des stratégies et la prise de décision. Les principales FE sont : (i) l'inhibition qui permet la résistance aux habitudes ou automatismes (heuristiques), aux tentations, distractions ou interférences ; (ii) le *switching* ou flexibilité qui permet de s'ajuster au changement par l'inhibition d'un automatisme, puis l'activation d'une nouvelle stratégie ; (iii) la mémoire de travail (MDT) qui permet de maintenir et manipuler mentalement des informations et/ou instructions lors des deux processus précédents – la MDT est distribuée dans un large réseau pariétofrontal (Constantinidis & Klingberg, 2016 ; Deary *et al.*, 2010).

De façon scientifique, Diamond a évalué les effets de divers jeux de fonctions exécutives visant à exercer l'inhibition motrice et cognitive des enfants dans un programme d'apprentissage par les interactions sociales inspiré de Vygotski et Luria (on y retrouve aussi Bruner et même Freinet). Ces jeux d'inhibition ont été introduits dans toutes les activités de la journée, y compris dans les activités linguistiques ou de calcul. Le programme expérimental s'appelait « *Tools of the Mind* » (« Les outils de l'esprit ou de l'intelligence »).

Par exemple, lors d'un exercice de mathématiques, une petite fille vérifiait que son camarade avait compté correctement. Dans cette activité de calcul pratique à deux, les enfants étaient tour à tour « compteur » et « vérificateur », ce qui entraînait l'inhibition (pendant que l'autre comptait les objets) et l'introspection (pendant que l'autre vérifiait). Il y avait aussi le jeu du pictogramme de l'oreille dessinée sur un carton qui signifiait que l'enfant qui le tenait en main devait écouter, pendant que l'autre racontait une histoire autour d'un livre d'images partagé. On entraînait ainsi l'inhibition de l'envie de parler (l'heuristique égocentrée). Après quelques mois de pratique de cet exercice, l'aide visuelle constituée par le carton de l'oreille devenait de moins en moins nécessaire. La régulation devenait alors interne ou autorégulation, comme le préconisait Vygotski.

Les enfants qui, en plus de l'apprentissage académique classique,

avaient participé de façon régulière à des jeux éducatifs de ce type ont ensuite mieux réussi les tests sur les acquis scolaires que les enfants d'un groupe contrôle, sans jeux d'inhibition (Diamond *et al.*, 2007 ; Diamond & Lee, 2011).

Une étude antérieure de Rueda et collaborateurs avait déjà démontré en 2005 l'impact direct d'exercices informatisés de contrôle attentionnel sur le cerveau de jeunes enfants d'école maternelle dans des régions sous forte influence génétique comme le cortex préfrontal et le Cortex Cingulaire Antérieur (CCA). Nous avons nous-mêmes démontré au laboratoire, en Imagerie par Résonance Magnétique anatomique (IRMa), que la structure (les sillons) de cette même région (CCA), mise en place *in utero*, prédisait en partie (environ 20 %) les performances exécutives d'inhibition au test de Stroop, cité plus haut, à la fin de l'école maternelle (avec une version du test adaptée aux enfants de cet âge ; Cachia *et al.*, 2014) et à la fin de l'école élémentaire lors d'un suivi longitudinal (Borst *et al.*, 2014). C'est ici une contrainte structurale précoce. Comme le disait déjà Locke au ^{xvii}e siècle, bien qu'il fût empiriste, tous les enfants ne sont pas égaux au départ, attribuant ces différences à la nature. Cela veut dire aussi que, d'un point de vue neuropédagogique, il faut être très vigilant, dès l'école maternelle, aux besoins différenciés des enfants en termes d'apprentissage attentionnel (Rueda) et, en particulier, de contrôle inhibiteur (Diamond) – pour compenser par la culture (l'école) et l'étayage social (Vygotski, Luria, Bruner) les contraintes cérébrales précoces.

Dans son expérience de classe maternelle Montessori en Zone d'Éducation Prioritaire (ZEP) et « plan violence » à Gennevilliers, Alvarez (2016) décrit comment, entre autres principes de sciences cognitives, elle a mis en avant l'importance d'exercer le contrôle inhibiteur des enfants. Par exemple, un petit jeu consistait à apprendre systématiquement aux enfants à patienter lorsque la maîtresse dirigeait son attention vers un autre enfant : « Mais arrête, tu vois bien que William essaye de parler à Céline », disait l'assistante qui l'aidait. « Attends ! » Sans s'offusquer, les enfants apprenaient à inhiber, à résister, car ils savaient que la règle sociale était la même pour tous. Le jeu était alors de poser sa main sur l'épaule de la maîtresse (comme

plus tard, ils lèveront le doigt en classe) pour l'informer de la demande d'interaction, sans parler ! Soit, l'enfant attendait sans rien faire, soit il s'occupait à autre chose, en parallèle. L'intérêt de cet exemple, très simple, est que la maîtresse (ou éducatrice Montessori) ne voyait pas seulement cette situation comme une contrainte d'organisation, une difficulté personnelle (un stress) à gérer simultanément les nombreux enfants en libre circulation dans la classe, mais, au contraire, comme l'opportunité d'un exercice pédagogique positif du contrôle inhibiteur du cortex préfrontal – ainsi le percevait-elle ! – de chacun d'entre eux : apprendre à résister, patienter, garder leur idée en tête pendant le temps de l'attente (ce que l'on appelle le maintien en mémoire de travail), sans se laisser distraire par la conversation qui se déroulait devant eux (inhibition des distracteurs). Les enfants les plus tenaces, les « meilleurs inhibiteurs » – tant pour les distracteurs externes que pour leur égocentrisme interne –, devenaient capables et fiers d'attendre leur tour pendant dix longues minutes. Parfois, ils trouvaient même d'autres solutions à leur problème, ce qui exerçait leur capacité de flexibilité cognitive.

Cet exemple de la vie quotidienne en classe rappelle le principe d'une célèbre étude scientifique de gratification différée, dite du « Marshmallow » ou test de la guimauve, qui s'est révélé être plus prédictif que le test du QI (Binet, Stern) pour la réussite scolaire et sociale ultérieure (Mischel *et al.*, 1972 ; Yuichi *et al.*, 1990). En 1972, le psychologue social Walter Mischel de l'Université Stanford a mesuré le délai durant lequel 500 enfants de 4 ans, qui étaient filmés individuellement, résistaient à la tentation de manger une guimauve tout de suite, alors qu'ils recevaient la promesse d'en recevoir deux comme récompense plus tard... s'ils patientaient un peu ! Vous pouvez trouver facilement les vidéos de ce test sur *YouTube* et vous verrez combien l'inhibition en acte est difficile pour certains enfants (elle l'est autant, à tous les âges, « en pensée », mais c'est moins visible !). Le suivi longitudinal de cette cohorte d'enfants jusqu'à l'adolescence et l'âge adulte a révélé très clairement que ceux qui avaient un meilleur contrôle inhibiteur à l'école maternelle dans le test du « Marshmallow » étaient ceux qui, par la suite, parvenaient à développer et entretenir les meilleures relations sociales à l'école et

dans la vie. Ils faisaient preuve d'autorégulation cognitive et affective en diverses circonstances, d'où de meilleurs résultats scolaires et professionnels, ainsi que de moindres comportements déviants à l'adolescence (agressivité, problèmes d'alcool ou de drogue). En outre, une analyse plus fine des paramètres en jeu, menée dans une étude complémentaire, a démontré que la dimension essentielle de ce test était la confiance que les enfants pouvaient accorder à l'adulte qui leur promettait une gratification différée (sinon mieux valait manger directement le Marshmallow), d'où l'importance d'un environnement éducatif fiable, bienveillant, avec la possibilité régulière d'un calcul exact de différence entre les récompenses espérées et celles obtenues. C'est de cette confiance que parlaient Decroly et Bruner.

De façon générale et pratique, pour entraîner l'enfant à être attentif dans une tâche (Lachaux, 2011, 2016), il est utile de définir avec lui l'objectif à atteindre et de décomposer la tâche en étapes ; lui demander comment il va s'y prendre permet de tester son attention et d'entraîner ses capacités de planification. On peut également lui expliquer qu'en répétant des instructions dans sa tête (mémoire de travail), il peut parvenir à mieux se concentrer, et l'aider à prendre conscience des distractions auxquelles il est soumis pour apprendre à y résister (contrôle inhibiteur). La pratique d'un sport ou d'un instrument de musique améliore aussi les fonctions exécutives du cerveau (Bermudez *et al.*, 2009 ; Diamond, 2015 ; Diamond & Lee, 2011 ; Gaser & Schlaug, 2003 ; Moreno *et al.*, 2011 ; Schellenberg, 2004), en particulier dans les milieux défavorisés, dès l'école maternelle (Neville *et al.*, 2013).

Les études de neurosciences portant spécifiquement sur la mémoire de travail, dont la capacité est limitée de $1 \text{ à } 7 \pm 2$ éléments selon les individus au cours des âges du développement, montrent que cette mémoire à court terme peut être efficacement entraînée (se souvenir d'éléments vus à l'écran, de formes, par exemple, et de localisations, etc.) et que cet apprentissage accroît l'activité des neurones du cortex préfrontal, ainsi que leur connectivité avec le cortex pariétal (Constantinidis & Klingberg, 2016 ; voir aussi Jaeggi *et al.*, 2008 ; Klingberg, 2010 ; Klingberg *et al.*, 2005 ; McNab *et al.*, 2009 ; Olesen, 2004).

Conjuguée à la mémoire de travail, l'attention est l'exemple par excellence d'un processus transversal à toutes les fonctions cognitives car elle permet la sélection des informations à traiter dans le cerveau et le maintien ou les variations du niveau de traitement de ces informations (Amso & Scerif, 2015). Déjà Montessori préconisait, il y a un siècle, une éducation à l'attention ! Un peu comme un faisceau, cette attention peut être orientée de façon exogène (par une indication extérieure) ou endogène (un but). Les régions postérieures du cerveau (avec une spécialisation à droite pour l'attention), notamment les régions pariétales, sont impliquées dans la sélection de l'information visuospatiale (Petersen & Posner, 2012). Le cortex préfrontal intervient, quant à lui, comme un « système attentionnel superviseur » (Shallice, 2004) qui permet, en particulier, l'inhibition – le blocage – des stratégies cognitives non pertinentes (les « routines » ou heuristiques). L'inhibition est donc aussi un processus d'attention sélective. Les deux notions se superposent.

Il existe par ailleurs un lien étroit entre le système attentionnel et la conscience car c'est ce système qui permet de sélectionner « l'objet de la conscience » dans un espace de travail neuronal global (Dehaene, 2014 ; Dehaene & Changeux, 1998, 2011 ; voir la figure 9). L'attention est aussi fortement requise pour l'apprentissage, du moins lorsqu'il est explicite. Étant une sorte de « colle invisible et repositionnable » qui réunit temporairement (en mémoire ou espace global de travail) les éléments pertinents que le cerveau doit traiter à l'exclusion des autres (inhibition), on pourrait presque ne pas s'apercevoir de l'attention ! Or, si elle fait défaut, on ne fait pas ou plus grand-chose. C'est particulièrement vrai chez les enfants à l'école. Il est dès lors très important de l'entraîner. Des jeux informatisés le permettent aujourd'hui (Tang & Posner, 2009) ainsi que des albums de bande dessinée (*Les petites bulles de l'attention. Se concentrer dans un monde de distraction*, Lachaux, 2011, déjà cité). Des travaux expérimentaux ont également démontré l'effet bénéfique de la pratique des jeux vidéo, très en vogue aujourd'hui, sur les capacités d'attention visuelle sélective des enfants et des adolescents (Bavelier *et al.*, 2012 ; Dye & Bavelier, 2010 ; Green *et al.*, 2010 ; Green & Bavelier, 2003, 2008) – pour une synthèse complémentaire sur « Les écrans changent-ils le cerveau ? », modifications de la mémoire, fatigue visuelle, pratiques

excessives, etc., voir Houdé (2016b).

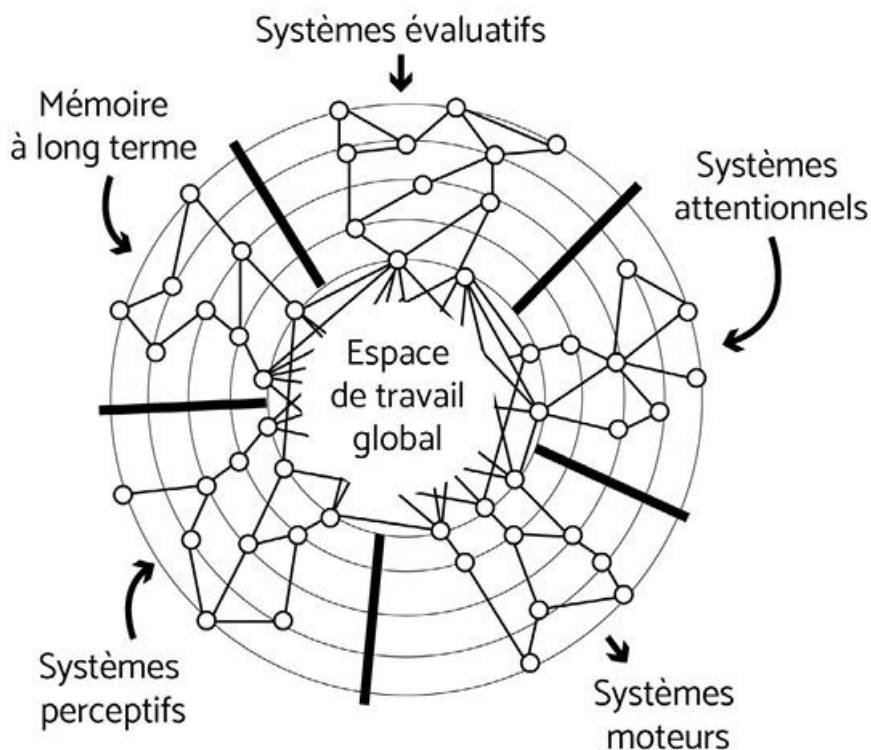


Figure 9 – La théorie de l'espace (ou mémoire) de travail neuronal global : de nombreux processeurs spécialisés y convergent ; les systèmes attentionnels contribuent à la focalisation du cerveau sur un « objet de conscience » (d'après Dehaene *et al.*, 1998 ; Dehaene & Changeux, 2011).

Expliquer le cerveau et le contrôle cognitif aux enfants

On peut aussi expliquer directement certains mécanismes clés (heuristiques, algorithmes exacts, inhibition : Systèmes 1, 2, 3, voir la section « Un développement dynamique et non linéaire ») aux enfants par des mots simples et à propos de situations scolaires. C'est ce que nous avons fait dans un article illustré paru dans la revue *Frontiers for Young Minds* (Brault Foisy *et al.*, 2015, en accès libre en ligne) dont le titre traduit de l'anglais est « Bloquer notre cerveau : Quand nous devons inhiber des erreurs répétitives ! ». L'article a été expertisé, pour sa compréhension, par Julien, un enfant de 12 ans. Il nous a demandé beaucoup de précisions. Plusieurs dessins réalisés par le

graphiste de la revue montrent comment lors d'une course entre H (l'Heuristique) et A (l'Algorithme exact) dans le cerveau, « Capitaine I » (Inhibition) doit intervenir, grâce au cortex préfrontal, pour arrêter H et laisser passer A le premier sur la ligne d'arrivée ! On peut ainsi, à partir de cette métaphore, entraîner l'enfant à inhiber en le confrontant à des situations-pièges pour les mathématiques, la lecture, le raisonnement, etc.

Dans cet esprit, notre laboratoire en France, le LaPsyDÉ du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS)⁸, propose depuis la rentrée 2017-2018 des expérimentations collaboratives (cartographie des heuristiques, apprentissages et jeux d'inhibition) avec des enseignants des cycles 1, 2 et 3 du primaire (écoles maternelles et élémentaires) *via* la plateforme numérique de la communauté pédagogique Lea (*L'école aujourd'hui*) de l'éditeur scolaire Nathan (<http://lea.nathan.fr/>). Le numérique permet ainsi d'expérimenter à grande échelle le transfert des sciences cognitives vers les pratiques de la classe, selon un processus continu d'allers-retours du labo à l'école. J'invite les lecteurs enseignants du primaire de tous les pays francophones (France, Belgique, Luxembourg, Suisse, Canada, Liban, pays africains, etc.) à s'y inscrire nombreux ! Il existe aussi en France, vers l'enseignement primaire et secondaire, les Cogni'classes (dédiées aux sciences cognitives) animées par Jean-Luc Berthier, proviseur honoraire.

Enfin, nous avons réalisé, avec Grégoire Borst, un album sur le cerveau expliqué aux enfants d'école primaire : *Mon cerveau : Questions ? Réponses !* chez Nathan jeunesse (Houdé & Borst, 2018). L'idée est de leur expliquer, simplement, les clés de fonctionnement de leur propre cerveau, boîte à outils de leurs apprentissages au quotidien. On dit à l'enfant : « Tu sais qu'il y a des recherches sur la Terre, l'Univers, les dinosaures,... Et bien, il y en a aussi sur ce qui se passe dans le système nerveux central, en particulier le cerveau (le tien !), à tous les âges de la vie : comment fonctionne et se développe le cerveau, comment le soigner et le réparer quand il est malade ou accidenté, etc. ? Ce sont les neurosciences. Dans cet album, 32 questions/réponses (voir l'Encart) se succèdent à propos de thèmes variés, du neurone à l'IRM, la lecture, les mathématiques, les rêves,

etc.

32 questions sur le cerveau pour les enfants

Qu'y a-t-il dans ta tête ? À quoi sert le cerveau ? On oublie qu'on a un cerveau ? De quoi se compose le cerveau ? Qu'est-ce qu'un neurone ? Comment voyagent les informations ? Qu'est-ce que les neurosciences ? Depuis quand explore-t-on le cerveau ? Comment voit-on dans la tête ? C'est dangereux de passer une IRM ? Comment fonctionne une IRM ? Comment se préparer pour une IRM ? C'est quoi une expérience de psychologie ? Comment le cerveau apprend-il ? Y a-t-il une aire de la lecture ? Et pour les maths ? Le cerveau peut-il faire des erreurs ? Comment « résister » à ses erreurs ? Mon cerveau est-il comme celui des autres ? Comment change-t-il depuis la naissance ? Peut-on dire qu'il est unique ? Mon chat a-t-il le même cerveau que moi ? Les animaux ont-ils de la mémoire ? Les animaux ont-ils tous un cerveau ? Le cerveau est-il fragile ? Peut-on le réparer, le rééduquer ? Et quand il dort ? Le cerveau rêve-t-il ? Aime-t-il l'art ? Qu'est-ce que l'intelligence ? Les robots ont-ils un cerveau ? On sait tout sur le cerveau ?

Les réponses sont dans l'album (Houdé & Borst, 2018).

Voilà de quoi, à la maison ou à l'école, initier des leçons et des discussions avec les enfants autour de leur cerveau. Outre que cela contribuera à leur culture scientifique, la lecture d'un tel album devrait éveiller en eux une conscience réflexive, une forme de métacognition neuronale, à chaque moment de la journée, à propos de ce qu'ils ont d'extraordinaire dans la tête : le cerveau humain ! C'est aussi cela la neuropédagogie.

La question du contrôle cognitif ne concerne pas seulement les apprentissages scolaires classiques, tels que lire, écrire, compter, penser ou raisonner (dans les exemples précédents), mais aussi le contrôle de soi pour la tolérance et la paix.

En effet, le développement social de l'enfant est lui-même caractérisé par un mécanisme d'inhibition (comme dans les aspects cognitifs), mécanisme qui joue un rôle clé pour apprendre à considérer le point de vue d'autrui (Aïte *et al.*, 2016). Dans cette dernière étude, menée avec Alain Berthoz du Collège de France, des enfants d'âge scolaire (10 ans) et des adultes devaient imaginer la perspective corporelle et spatiale d'un autre, différente de la leur : personnage de face ou de dos. Avec un paradigme expérimental dit « d'amorçage négatif » (voir la section « Piaget revisité : heuristiques, algorithmes exacts et inhibition »), nous avons mesuré, grâce à la chronométrie mentale en millisecondes, l'effort spécifique d'inhibition lors de cette tâche d'adaptation sociale. Les résultats ont indiqué que, tant les adultes que les enfants, devaient inhiber leur propre point de vue, égocentré – ce qui était coûteux cognitivement – à chaque fois qu'ils voulaient activer le point de vue de l'autre. C'est un « biais asocial » que Piaget appelait la « centration » (ou égocentrisme), mais qui, contrairement à ce qu'il pensait, ne disparaît pas (décentration) avec le stade des opérations logiques à 7 ans. Dans le cerveau humain, l'heuristique égocentrée (toujours le Système 1) persiste et domine ! Il faut constamment y résister.

Déjà Montaigne, dans ses *Essais*, se disait effaré par l'égocentrisme et le sociocentrisme des adultes, dont l'ancrage est d'abord physiologique et corporel. « Nos yeux ne voient rien en arrière », écrivait-il ! Et cet égocentrisme corporel devient rapidement cognitif et moral. Apprendre à inhiber (Système 3) dès l'enfance cet égocentrisme du cerveau (heuristique du Système 1), c'est éduquer à la tolérance (Système 2 ou algorithme sociocognitif de coordination logique des points de vue). Il s'agit de se construire une « théorie de l'esprit » (du point de vue et des émotions) du cerveau de l'autre et, surtout, l'exercer (Gallagher & Frith, 2003 ; Mahy *et al.*, 2014). Ainsi,

tant pour les aspects cognitifs et scolaires (mathématiques, lecture, orthographe), que psychosociaux (décentration sociale et tolérance), apprendre à apprendre, c'est bien souvent inhiber, en partie, son propre cerveau, pour soi-même (corriger ses erreurs) ou pour le respect d'autrui.

Cette fonction d'inhibition, de résistance, du cortex préfrontal, testée ici par une procédure de psychologie expérimentale dans une tâche d'adaptation sociale, rejoint les intérêts premiers de l'éducation nouvelle, tant Montessori que Freinet : servir la paix de l'humanité. C'était une préoccupation majeure à l'époque des deux dernières guerres mondiales. Ce l'est à nouveau aujourd'hui dans l'actualité du terrorisme international et de la radicalisation religieuse (Houdé, 2017b).

Cette éducation du cortex préfrontal en contexte social correspond à l'esprit critique et de tolérance que la jeunesse doit cultiver, pour l'école, contre la terreur. Comme le suggère Changeux (2016), « avec les acquis d'un savoir scientifique universel, l'homme devrait s'engager à utiliser les facultés créatrices qu'il possède dans son cerveau pour donner du sens à ce qui en demande le plus : l'homme lui-même. Il lui revient, de toute urgence, d'inventer un “modèle éthique” qui tranche avec les violences, les intolérances et les crimes de notre passé culturel, et assure plus efficacement la survie et le “bien-vivre” de l'humanité. » (p. 44) C'est aussi ce que Damasio (2017) préconise, *via* les émotions et les sentiments, pour l'homéostasie de l'humanité.

La neuropédagogie peut y contribuer.

L'éveil du beau

Ajoutons encore aux principes d'apprentissage du cerveau, l'importance d'éveiller l'enfant à la beauté. Depuis notre référence initiale à Platon sur le vrai, le bien et le beau, nous avons beaucoup traité du vrai (la logique, les algorithmes exacts ou règles cognitives à apprendre à l'école en diverses matières), un peu du bien, à l'instant (avec la tolérance, le respect d'autrui et la paix), mais pas encore du

beau.

Aujourd'hui, l'éducation artistique et culturelle est encouragée à l'école, de la maternelle au lycée, par les textes officiels. Mais, dans la réalité, les parents sont quelquefois surpris que le cours de dessin de leur enfant soit supprimé ou réduit à une portion congrue. Le français et les mathématiques dominent... Tout se passe comme si l'art et la beauté étaient une variable d'ajustement dans l'agenda scolaire.

Déjà Jules Ferry au ^{xix}^e siècle, bien qu'en charge des Beaux-Arts, avait introduit le dessin et la musique en dernière position des programmes de l'école primaire. Mais des voix se sont toujours élevées contre ce sort réservé à la beauté. L'écrivain Champfleury soulignait, dès la fin du ^{xix}^e siècle, que la plus petite parcelle de beau perçue par l'enfant prédispose à la délicatesse et à la formation du goût. À la même époque, l'architecte Viollet-le-Duc, citant Schiller, recommandait de décorer avec soin les écoles de Paris, car le beau, parce qu'il est harmonieux, aide à la construction morale. Hélas, de nos jours, il y a encore beaucoup de cours d'école grises et bétonnées qui consacrent l'austérité plus que la beauté. Montessori aussi insistait sur l'esthétique de l'environnement pédagogique (épuré) de l'enfant. Mais, scientifiquement, la beauté est-elle si importante que cela pour le cerveau des élèves ? C'est le sujet du livre *La beauté dans le cerveau* de Changeux (2016), qui ébauche une véritable neuroscience de l'art (voir aussi *Les neurones enchantés* de Boulez *et al.*, 2014, pour le cerveau et la musique).

On découvre dans Changeux (2016) que la contemplation d'un dessin ou d'une peinture par l'œil et l'écoute de la musique par l'oreille correspondent à des phénomènes physicochimiques : des communications moléculaires *via* des protéines spéciales (dites « allostériques ») dans nos récepteurs sensoriels rétiniens ou auditifs. Changeux raconte comment cette physicochimie déclenche de véritables trains d'impulsions nerveuses qui se propagent, de manière ascendante, jusqu'au cortex cérébral où s'opère un travail d'analyse, puis de resynthèse ultime de l'œuvre. En outre, on sait aujourd'hui que les motifs d'activation des neurones dans le cortex visuel ressemblent aux motifs géométriques des images observées (*via* la rétinitopie, Tootell *et al.*, 1998 ; Wang & Burkhalter, 2007), parfois de

façon quasi mimétique, et il en est de même pour le cortex auditif avec les sons (*via* la tonotopie, Humphries *et al.*, 2010 ; Talavage *et al.*, 2004). Ainsi, selon Changeux (2016), des traces de l'environnement, en l'occurrence artistique et culturel, s'impriment quasi directement (*via* les molécules et impulsions nerveuses) dans le cerveau des enfants – on grave en eux, disait Montessori (1936), absolument comme un burin incise dans la pierre !

Dans un second temps, la « vérité » de l'œuvre s'enrichit, pour chacun, de l'accès conscient au sens et à la mémoire. Plus précisément, Changeux fait l'hypothèse d'un espace de travail neuronal global (déjà évoqué, Dehaene & Changeux, 2011, voir la figure 9), terme qui désigne ici la synchronisation de l'activité de plusieurs aires cérébrales sollicitées par la contemplation d'une œuvre d'art – des aires visuelles ou auditives, mais aussi d'autres zones impliquées dans le raisonnement, le souvenir et l'émotion. Sous la supervision de la partie antérieure du cerveau, le cortex préfrontal, cette synchronisation aurait pour effet de mêler émotion et raison, une alchimie ou synthèse neuronale qui serait à la base du sentiment du beau.

Cette synthèse répond à trois critères cognitifs : (i) la nouveauté associée à la surprise, (ii) l'équilibre entre les parties et le tout – la cohérence ou *consensus partium* – et (iii) la parcimonie. Rare est leur conjonction. Le dernier critère, la parcimonie, est commun à la science et à l'art. En effet, la beauté d'une proposition scientifique tient au fait qu'elle explique beaucoup à partir de peu. De même, lorsque Rembrandt pose la touche de blanc qui illumine un regard ou que Matisse, ou Picasso, réalise un portrait ressemblant d'un simple trait continu, c'est de la parcimonie.

L'éducation en famille ou à l'école doit dès lors veiller à exposer en priorité le cerveau des enfants à la beauté, par la découverte assidue et approfondie des œuvres les plus riches et par la créativité de chacun : « L'exploration incessante de l'environnement conduit à la sélection progressive [Changeux & Danchin, 1972] de "circuits neuroculturels" propres à chaque individu » (Changeux, 2016, p. 124-125). Ici encore, rappelons-nous Montessori (1936) : l'enfant est un véritable accumulateur... Faisons de son cerveau un

« accumulateur de beauté » ! Aujourd'hui, les musées numériques et leurs expositions virtuelles (pour Le Louvre, Versailles, etc.), accessibles de partout dans le territoire, peuvent y aider. C'est la « culture mobile » où l'informatique et les neurosciences ont la potentialité de nous rediriger, comme le faisait déjà Platon, vers la recherche de la beauté !

Un mot plus personnel pour la fin. Étant scientifique, mais aussi peintre amateur depuis mon adolescence, je peux témoigner combien la conjonction des trois critères énoncés par Changeux (nouveau, cohérence et parcimonie) est difficile à atteindre, mais le travail et l'inspiration peuvent y conduire. Un tableau en cours repose toujours sur mon bureau de la Sorbonne, adossé à la bibliothèque, pour me rappeler cet objectif tant en science qu'en art. Et mon expérience d'instituteur m'a permis de constater que ces règles de la beauté dans le cerveau peuvent être exercées, chez les enfants, tant en mathématiques qu'en français et en arts graphiques ou musicaux (dans la danse aussi, avec la cohérence et la parcimonie des gestes et des mouvements du corps). Renforçons les correspondances entre ces domaines dans l'agenda scolaire ; le cerveau s'y retrouvera.

En résumé, des Lumières aux neurosciences

Dans un album publié chez Larousse intitulé *Un siècle d'école : Toute l'histoire de l'école, de Jules Ferry à nos jours* (Viart, 2012), illustré de fac-similés exceptionnels, d'images d'Épinal aux souvenirs colorés d'enfance et d'école, on trouve une succession de doubles pages qui racontent :

- Les Lumières ouvrent la voie ;
- Jules Ferry, le père de l'école publique ;
- L'ascension des « hussards » de la République ;
- Vive la rentrée des classes ;
- L'apprentissage de la lecture ;
- L'abécédaire dans tous ses états ;
- Apprendre à écrire ;

- Compter, additionner, soustraire, multiplier ;
- Les terribles problèmes de math ;
- L'histoire et toutes ses dates ;
- La géographie, la France et le Monde ;
- La leçon de choses ;
- La morale à l'épreuve du temps ;
- Colliers de nouilles et autres travaux sans importance (travaux manuels, dessin, peinture !) ;
- 1968 et le souffle des réformes.

Le chapitre qui s'ajoutera sans doute, dans les albums à venir, est celui de l'exploration inédite du cerveau des élèves, rendue possible grâce aux nouvelles sciences cognitives et à l'imagerie cérébrale, au début du XXI^e siècle. C'est évidemment historique. On pourrait l'appeler :

- « La neuropédagogie, à la découverte du cerveau des élèves » ou « L'école du cerveau » !

Sans doute faudra-t-il aussi ajouter une double page sur la révolution numérique :

- « Ordinateurs et tablettes à l'école : coder et utiliser les écrans pour apprendre ».

La Fondation La Main à la Pâte a déjà publié, pour l'école primaire ou la maison, un module pédagogique intitulé « Les écrans, le cerveau et l'enfant : Un projet d'éducation à un usage raisonné des écrans » (Pasquinelli *et al.*, 2013) à partir d'un Avis de l'Académie des sciences que nous avons rédigé parallèlement, *L'enfant et les écrans* (Bach *et al.*, 2013). Cette fondation a aussi réalisé 1, 2, 3, ... *Codez ! Enseigner l'informatique à l'école et au collège* (Calmet *et al.*, 2016, 2017). En France, le codage a été introduit à l'école primaire à la rentrée 2016, sous l'impulsion de

Gérard Berry, titulaire de la Chaire *Algorithmes, machines et langages* du Collège de France. Le Conseil national du numérique avait préconisé en 2014 un programme intitulé « Jules Ferry 3.0, bâtir une  cole créative et juste dans un monde numérique ».

  n'en pas douter, tant les sciences cognitives et l'imagerie du cerveau des élèves que la révolution numérique jusqu'à l'intelligence artificielle, après celle de l'imprimerie jadis, ouvriront de nouvelles doubles pages dans l'histoire de l' cole !

Notes

1 Le *Program for International Student Assessment* (PISA) est une enquête d'évaluation d'acquis scolaires menée tous les trois ans auprès de jeunes de 15 ans dans les 34 pays membres de l'Organisation de Coopération et de Développement économiques (OCDE) et dans de nombreux pays partenaires.

2 En psychologie cognitive, il suffit d'opposer le terme d'heuristique (au sens de Kahneman, 2012) à celui d'algorithme pour se faire comprendre. Le terme « algorithme exact » pourrait donc paraître un pléonasme. Mais en informatique et en intelligence artificielle, en particulier en algorithmique, tout est algorithme (car tout est programmé), y compris les heuristiques. Il est donc préférable de distinguer, pour être précis, les heuristiques (algorithmes approximatifs) et les algorithmes exacts qui conduisent toujours au bon résultat.
<https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/course-2014-2015.htm>

3 Nous avons aussi démontré, en Imagerie par Résonance Magnétique anatomique (IRMa), que la structure (la forme des sillons) dans cette région, mise en place *in utero*, a un impact sur les performances de lecture à l'âge scolaire (Borst, G., *et al.*, 2016. Early cerebral constraints on reading skills of school-age children: An MRI study. *Mind, Brain & Education*, 10, p. 47-54).
<http://www.fondation-lamap.org/>

4 Voir aussi Perfors *et al.* (2011) et le cours du Collège de France 2012 de Dehaene :
<https://www.college-de-france.fr/site/stanislas-dehaene/course-2011-2012.htm>

5 Le cortex préfrontal et le cortex pariétal de l'enfant doivent donc ici, dans la tâche de Piaget, apprendre à « travailler ensemble » (dans un jeu d'activation/inhibition), ce que Johnson (2001) a appelé la spécialisation interactive de plusieurs régions du cerveau, processus différent et complémentaire de la maturation d'une région donnée.

6 Laboratoire de Psychologie du Développement et de l'Éducation de l'enfant, Sorbonne, 46 rue Saint-Jacques, 75005 Paris, France.

Conclusion

Un siècle après l'éclosion du mouvement de l'éducation nouvelle, les écoles ou classes Freinet et Montessori (même Decroly), restées alternatives, existent toujours. Aux États-Unis, par exemple, on compte environ 5 000 écoles labellisées Montessori.

En 2006, la revue américaine *Science* a publié une étude d'évaluation de cette pédagogie dans l'une d'entre elles, auprès d'enfants de 5 à 12 ans, avec une méthodologie scientifique utilisant un groupe contrôle : « Evaluating Montessori Education » (Lillard & Else-Quest, 2006). Les résultats ont révélé des avantages très significatifs pour les enfants du groupe Montessori par rapport au groupe contrôle. À la sortie de l'école maternelle, les enfants étaient nettement meilleurs en lecture (décodage et phonologie, identification de mots) et en exercices de mathématiques. À l'entrée dans l'enseignement secondaire, ils se démarquaient par une plus grande créativité littéraire (textes plus longs, phrases complexes). En outre, ils présentaient, à tous les âges, des compétences psychosociales plus élevées : respects des autres, interactions positives et constructives (voir Fournier, 2016a).

Les rapprochements entre Montessori, les autres pédagogues de l'éducation nouvelle, Freinet, Decroly, les grands psychologues, Binet, Piaget, Vygotski, Bruner, Skinner, et les sciences cognitives contemporaines ont été proposés au cours du livre, au fil des idées et des expériences rapportées. Je n'y reviens pas. Il y a certainement beaucoup d'autres rapprochements ou oppositions (de Platon aux neurosciences) qui seront venus à votre esprit, que je n'ai pas mentionnés, et c'est bien ainsi. Il s'agissait de déclencher la réflexion et des lectures complémentaires à partir de la bibliographie assez complète que vous trouvez en fin d'ouvrage.

Vous l'avez compris, mon objectif principal était de corriger l'idée selon laquelle la neuropédagogie serait une science tout à fait nouvelle « secrétée par l'imagerie cérébrale » depuis 10 ou 15 ans. Non, au

contraire ! J'ai voulu montrer combien elle était emboîtée dans et préparée par Platon, Locke, Rousseau (les Lumières), Itard, Seguin, Montessori, Freinet, Decroly, Binet, Piaget, Vygotski, Bruner et Skinner ! Tous conduisaient vers la pédagogie et la psychologie expérimentales, ainsi que vers l'exploration du cerveau des élèves dès que ce fut possible.

Les essentiels de la neuropédagogie

- Dans l'enseignement magistral, vertical, collectif, classique, on a tout simplement oublié, pour des raisons pratiques ou faute de s'intéresser à la psychologie et au cerveau des enfants, qu'un organisme passif n'apprend pas ou mal (se rappeler les leçons de Piaget, Montessori et Freinet, ou aujourd'hui La Main à la Pâte). En classe, il faut donc organiser, le plus souvent possible, le travail en petits groupes, de manière à ce que le cerveau des élèves soit toujours motivé par un défi individuel et/ou collectif. Cela éveille, en outre, l'esprit de coopération.
- On éduque encore trop souvent « en aveugle » des millions de cerveaux, c'est-à-dire en manipulant les « entrées » (rythmes scolaires, nombre d'élèves par classe, etc.) et les « sorties » (résultats aux évaluations : contrôles, PISA), sans connaître assez bien les mécanismes internes du cerveau humain qui apprend à lire, écrire, compter, penser (ou raisonner) et respecter autrui.
- Dans le cerveau de chaque enfant ou adulte, des heuristiques très rapides et intuitives ou biais cognitifs (Système 1 ; D. Kahneman) et des règles logiques ou algorithmes exacts (Système 2 ; J. Piaget) peuvent entrer en compétition à tout moment, selon le contexte. C'est ce qu'on appelle des « conflits cognitifs ». Pour les dépasser, l'adaptation de l'ensemble du cerveau, c'est-à-dire l'intelligence ou la flexibilité, dépend de la capacité d'inhibition du cortex préfrontal (O. Houdé). C'est le mécanisme contraire et complémentaire de

l'automatisation. Les deux sont importants pour l'apprentissage dans l'enfance et tout au long de la vie.

- Quatre principes gouvernent « l'école du cerveau » : (i) la plasticité et le recyclage neuronal (pour la lecture par exemple), (ii) l'attention et le contrôle exécutif (notamment l'inhibition), (iii) l'engagement actif, la curiosité et la correction d'erreurs (importance des émotions) et (iv) la consolidation des apprentissages, le sommeil et l'optimisation de la mémoire (espacer les périodes d'apprentissage). Ne pas oublier aussi l'éducation et l'exposition du cerveau à la beauté à l'école, à la maison et dans les loisirs !

Les détracteurs de la neuropédagogie diront qu'on apprend ainsi, *via* des techniques très sophistiquées et des mots savants, ce que l'on savait depuis toujours : l'élève doit faire attention, se contrôler, être actif, curieux, corriger ses erreurs, bien exercer sa mémoire et bien dormir ! Oui, c'est vrai – avec toutefois ici des démonstrations expérimentales et cérébrales inédites –, mais c'est précisément parce que depuis sa phase philosophique qui remonte à Platon à sa phase neuroscientifique actuelle, en passant par les pédagogues et psychologues des Lumières au ^{xx}e siècle, cette science – comme toute science solide, en construction – avance de façon emboîtée (en mathématiques, il reste toujours que $1 + 1$ font 2).

Si certaines démonstrations et conclusions rencontrent les bonnes intuitions des parents ou des professeurs, c'est plutôt réconfortant ; n'oublions pas que ces derniers sont « experts en enfants » ! Les contradictions apparaissent plutôt avec les pratiques de l'école qui, souvent pour des raisons d'organisation, ne parvient pas – ni l'Éducation nationale – à appliquer les « essentiels de la pédagogie », déchiffrés par les fondateurs de l'éducation nouvelle, confirmés et précisés ici par les sciences cognitives. J'entendais encore récemment, en France, la direction générale de l'enseignement scolaire reconnaître, lors d'un conseil scientifique, que l'angle mort de l'éducation nationale est le travail personnel des élèves ! Or ce travail cognitif est le point clé de toute neuropédagogie.

Par ailleurs, la neuropédagogie (i) apporte certains démentis sans concession – contre la méthode globale de lecture par exemple (Decroly, Freinet, Foucambert) à proscrire définitivement¹ – et (ii) met en avant des processus d'apprentissage comme l'inhibition cognitive chez les enfants qui, hormis l'intuition ponctuelle de Binet en 1900, a trop souvent eu par le passé une connotation très négative (« l'enfant inhibé ») dans le domaine de l'éducation et du développement. Au point que Piaget l'a totalement ignorée ! De même que Montessori ou Freinet qui n'allaient pas à ce niveau de précision des processus cognitifs internes au cerveau. Aujourd'hui, avec la découverte de l'importance du cortex préfrontal et des fonctions exécutives dans un grand nombre de résultats d'imagerie cérébrale, dont les nôtres présentés ici, cette fonction inhibitrice apparaît comme essentielle à éduquer à l'école. Elle est transversale à toutes les matières. Mais y a-t-il des programmes scolaires d'inhibition préfrontale au sens positif du terme, pensés ainsi par l'Éducation nationale ?

Voilà pourquoi il faut donner une place à la neuropédagogie, comme à toute science, dans la formation initiale et continue des professeurs des écoles et auprès des décideurs politiques afin d'infléchir les pratiques, l'organisation de l'Éducation nationale (autant que possible), en pensant au cerveau des enfants, ce qui est bien le moins. Ce n'est antinomique, on l'a vu, ni de leurs émotions, ni de leurs corps, ni de leur liberté, ni des interactions sociales (pour la citoyenneté et le bien commun), ni de l'idée de culture et, encore moins, d'histoire ou de philosophie de l'éducation.

La neuropédagogie doit aussi aider les enfants présentant des troubles neurodéveloppementaux : dyslexie, dyscalculie, dyspraxie, déficit d'attention/hyperactivité, autisme, etc. D'autres livres, plus spécialisés en matière de dysfonctionnements, y sont consacrés : *Une école sans échec : L'enfant en difficulté et les sciences cognitives* (Glasel, 2013) et *La neuroéducation : La mémoire au cœur des apprentissages* (Eustache & Guillery-Girard, 2016, pour les troubles de la mémoire), livres déjà cités, mais aussi *L'enfant dyspraxique : Mieux l'aider à la maison et à l'école* (Huron, 2011). Même si l'éducation nouvelle s'est généralisée, avec Montessori, à tous les enfants, n'oublions pas que le point de départ d'Itard était bien un enfant en difficulté, Victor.

Outre que je serais heureux que ce livre crée des vocations, je souhaite qu'il vous serve à dénoncer la réduction ou caricature parfois faite de la neuropédagogie, ou neuroéducation, soit en attendant d'elle ce qu'elle ne peut ni ne veut faire (tout réinventer !), soit en voulant faire croire qu'il y a, dans le monde de l'école, d'un côté la culture (l'histoire des idées, les sciences de l'éducation éthérées, les pratiques intuitives et insondables de la classe, les grands pédagogues) et de l'autre côté la nature et le scientisme de la biologie. Cette vision est fausse et n'est pas dans l'intérêt des enfants. La science (neurosciences, sciences cognitives) peut susciter une recherche participative, avec le monde de l'éducation, sans qu'il s'agisse de scientisme.

On entend dire aujourd'hui, en une formule très démagogique : « La science ne fait pas la classe ! » (sont visées les neurosciences en général et la neuropédagogie en particulier)². Évidemment que la science ne fait pas la classe ! C'est comme si l'on disait dans le domaine de la santé : « La science ne fait pas la consultation médicale ! » Qui pense le contraire – même si la technologie, ordinateurs et robots, peuvent aider les médecins et les chirurgiens – ? Mais qui imaginerait ou accepterait une médecine sans science aujourd'hui ? Personne, ou alors les membres d'une secte ! Doit-on se résoudre, par rapport aux sciences cognitives, à ce que les professeurs soient ainsi enfermés dans l'image des médecins de Molière avant la naissance de la médecine expérimentale au ^{xix}^e siècle, au nom des sacro-saintes intuition et liberté pédagogiques ? Non, leur merveilleux métier (le mien) vaut beaucoup mieux – leur vocation aussi –, et ils sont d'ailleurs très curieux, parfois déjà acteurs, des avancées des sciences cognitives et du cerveau.

Être réellement du côté de Locke, Rousseau, Itard, Séguin, Montessori, Freinet et Piaget aujourd'hui, en ce début de ^{xxi}^e siècle, c'est s'intéresser sérieusement à la neuropédagogie (« la science en train de se faire », Merleau-Ponty) et faire l'effort, pour les chercheurs en psychologie du développement et en sciences de l'éducation, d'utiliser les technologies de la psychologie expérimentale et de l'imagerie cérébrale, avec la participation des enfants et professeurs volontaires des écoles, pour mieux comprendre le cerveau qui apprend. Un cerveau en contexte social et culturel ! Non pas pour que

la science fasse la classe – ce qui ne veut vraiment rien dire –, mais pour des allers-retours féconds du laboratoire à la classe. À cet égard, ce livre est un manifeste.

Notes

1 Beaucoup de professeurs des écoles privilégient déjà une méthode mixte où le syllabique est redevenu dominant, après la mode globale.

2 Titre d'une conférence-débat « Neurosciences et pédagogie : La science ne fait pas la classe ! », animée par Philippe Meirieu le 11 mai 2017 près de Lyon en France. Ce slogan circule aussi sur les réseaux sociaux pour entretenir l'obscurantisme pédagogique contre les neurosciences de l'éducation,... contre l'éducation nouvelle !

Remerciements

L'auteur remercie Marc Richelle et Xavier Seron de l'avoir convaincu d'écrire ce livre sur la neuropédagogie et de l'avoir accueilli dans leur collection. Il remercie également Marc Richelle de l'avoir invité, en parallèle, à donner deux leçons sur ce thème au Collège Belgique de l'Académie Royale les 21 et 22 novembre 2017 à Bruxelles. Enfin, il remercie Claire et Françoise Pruvot de leur relecture attentive du premier manuscrit de ce livre, au laboratoire de La Sorbonne, et Stéphanie Dagrain de son merveilleux travail d'édition chez Mardaga.

Bibliographie

AÏTE, A., *et al.* (2016). Taking a third-person perspective requires inhibitory control: Evidence from a developmental negative priming study. *Child Development*, 87, 1825-1840.

AJCHENBAUM-BOFFETY, B., & Léna, P. (2008). *Éducation, sciences cognitives et neurosciences*. Sous l'égide de l'Académie des sciences. Paris : PUF, 2008.

ALLEN, K., & MONYER, H. (2013). Neuroscience: The highs and lows of memory. *Nature*, 504, 228-229.

ALVAREZ, C. (2016). *Les lois naturelles de l'enfant*. Paris : Les Arènes.

AMSO, D., & SCERIF, G. (2015). The attentive brain: Insights from developmental cognitive neuroscience. *Nature Reviews Neurosciences*, 16, 606-619.

ANDLER, D. (Ed.) (1992). *Introduction aux sciences cognitives*. Paris : Gallimard.

ANDLER, D. (2016). *La silhouette de l'humain*. Paris : Gallimard.

ANSARI, D., *et al.* (2012). Neuroeducation: A critical overview of an emerging field. *Neuroethics*, 5, 105-117.

ANTONY, J., *et al.* (2012). Cued memory reactivation during sleep influences skill learning. *Nature Neuroscience*, 15, 114-116.

ARR, E., *et al.* (2016). Inhibition of the mirror-generalization process in reading in school-aged children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 145, 157-165.

BACH, J-F., *et al.* (2013). *L'enfant et les écrans : un Avis de l'Académie des sciences*. Paris : Le Pommier et Institut de France.

BALDWIN, D., *et al.* (1996). Infants' reliance on a social criterion for

establishing word-object relations. *Child Development*, 67, 3135-3153.

BATTRO, M., *et al.* (2008). *The Educated Brain: Essays in Neuroeducation*. Cambridge: Cambridge University Press.

BAVELIER, D., *et al.* (2012). Brain plasticity through the life span. Learning to learn and action video games. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 391-416.

BENTOLILA, A. (2017). La lecture : De l'apprentissage à la conquête du livre. In A. BENTOLILA (Ed.), *L'essentiel de la pédagogie*, p. 153-174. Paris : Nathan.

BERGSTRÖM, J. (1893). Experiments upon physiology memory by means of the interference of associations. *American Journal of Psychology*, 5, 356-369.

BERGSTRÖM, J. (1894). The relation of the interference to the practice effect of an association. *American Journal of Psychology*, 6, 433-442.

BERMUDEZ, P., *et al.* (2009). Neuroanatomical correlates of musicianship as revealed by cortical thickness and voxel-based morphometry. *Cerebral Cortex*, 19, 1583-1596.

BERTHOZ, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Paris : Odile Jacob.

BERTHOZ, A. (2009). *La simplicité*. Paris : Odile Jacob.

BERTHOZ, A. (2013). *La vicariance*. Paris : Odile Jacob.

BIDEAUD, J., *et al.* (2004). *L'Homme en développement*. Paris : PUF (édition Quadrige).

BINET, A. (1900). Attention et adaptation. *L'Année psychologique*, 6, 248-404.

BLAKEMORE, S.-J., & FRITH, U. (2005). *The Learning Brain: Lessons for Education*. Oxford: Blackwell.

BLANQUER, J.-M. (2014). *L'école de la vie : Pour que chacun puisse réussir*. Paris : Odile Jacob.

BLANQUER, J.-M. (2016). *L'école de demain : Propositions pour une éducation nationale renouvelée*. Paris : Odile Jacob.

BONAWITZ, E., *et al.* (2011). The double-edged sword of pedagogy: Instruction limits spontaneous exploration and discovery. *Cognition*, 120, 322-330.

BORST, G., *et al.* (2012). Inhibitory control in number-conservation and class-inclusion tasks: A neo-Piagetian inter-tasks priming study. *Cognitive Development*, 27, 283-298.

BORST, G., *et al.* (2014). Folding of the anterior cingulate cortex partially explains inhibitory control during childhood: A longitudinal study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 9, 126-135.

BORST, G., *et al.* (2015). The cost of blocking the mirror-generalization process in reading. *Psychonomic Bulletin & Review*, 22, 228-234.

BORST, G., *et al.* (2016). Early cerebral constraints on reading skills of school-age children: An MRI study. *Mind, Brain & Education*, 10, 47-54.

BOUJON, C., & LEMOINE, K. (2002). Le rôle de l'inhibition dans le contrôle attentionnel des traitements. In C. BOUJON (Ed). *L'inhibition : Au carrefour des neurosciences et des sciences de la cognition*, p. 79-104. Marseille : Solal.

BOULEZ, P., MANOURY, P., & CHANGEUX, J.-P. (2014). *Les neurones enchantés : Le cerveau et la musique*. Paris : Odile Jacob.

BRADLEY, M., *et al.* (2015). Imaging distributed and massed repetitions of natural scenes: Spontaneous retrieval and maintenance. *Human Brain Mapping*, 36, 1381-1392.

BRAULT FOISY, L.-M., *et al.* (2015). Blocking our brain: When we need to inhibit repetitive mistakes! *Frontiers for Young Minds*: [doi:10.3389/frym.2015.00017](https://doi.org/10.3389/frym.2015.00017).

BRUNER, J. (2015). *Car la culture donne forme à l'esprit : De la révolution cognitive à la psychologie culturelle*. Paris : Retz.

CACHIA, A., *et al.* (2014). The shape of the Anterior Cingulate Cortex (ACC) contributes to cognitive control efficiency in preschoolers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26, 96-106.

CALLAN, D., & SCHWEIGHOFER, N. (2010). Neural correlates of the spacing effect in explicit verbal semantic encoding support the deficient-processing theory. *Human Brain Mapping*, 31, 645-659.

CALMET, C., *et al.* (2016). 1, 2, 3, ... *Codez ! Enseigner l'informatique à l'école et au collège : Tome 1*. Paris : Le Pommier.

CALMET, C., *et al.* (2017). 1, 2, 3, ... *Codez ! Enseigner l'informatique à l'école et au collège : Tome 2*. Paris : Le Pommier.

CASEY, B.J., *et al.* (2005). Imaging the developing brain: What have we learned about cognitive development? *Trends in Cognitive Sciences*, 9, 104-110.

CASTRO-CALDAS, A., *et al.* (1998). The illiterate brain: Learning to read and write during childhood influences the functional organisation of the adult brain. *Brain*, 121, 1053-1063.

CEPEDA, N., *et al.* (2008). Spacing effects in learning: A temporal ridge line of optimal retention. *Psychological Science*, 19, 1095-1102.

CHABOT, R., *et al.* (2001). The clinical role of computerized EEG in the evaluation and treatment of learning and attention disorders in children and adolescents. *Journal of Neuropsychiatry and Clinical Neurosciences*, 13, 171-186.

CHANGEUX, J.-P. (1983). *L'homme neuronal*. Paris : Fayard.

CHANGEUX, J.-P. (2007). « Préface de Jean-Pierre Changeux », S. DEHAENE, *Les neurones de la lecture*, p. 14-19. Paris : Odile Jacob.

CHANGEUX, J.-P. (2008). *Du vrai, du beau, du bien : Une nouvelle approche neuronale*. Paris : Odile Jacob.

CHANGEUX, J.-P. (2012). Synaptic epigenesis and the evolution of higher brain functions. In P. SASSONE-CORSI & Y. CHRISTEN (Eds.), *Epigenetics, Brain and Behavior, Research and Perspectives in*

Neurosciences, p. 11-22. Berlin: Springer-Verlag.

CHANGEUX, J.-P. (2016). *La beauté dans le cerveau*. Paris : Odile Jacob.

CHANGEUX, J.-P. (2017). Climbing brain levels of organisation from genes to consciousness. *Trends in Cognitive Sciences*, 21, 168-181.

CHANGEUX, J.-P., & DANCHIN, A. (1972). Selective stabilisation of developing synapses as a mechanism for the specification of neuronal networks. *Nature*, 264, 705-712.

CHANGEUX, J.-P., et al. (2016). *L'homme neuronal, trente ans après*. Paris : Éditions Rue d'Ulm.

CHÂTEAU, J. (1978). *Les grandes psychologies dans l'Antiquité*. Paris : Vrin.

CONSTANTINIDIS, C., & KLINGBERG, T. (2016). The neuroscience of working memory capacity and training. *Nature Reviews Neuroscience*, 17, 438-449.

CSIBRA, G., & GERGELY, G. (2009). Natural pedagogy. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 148-53.

DAMASIO, A. (1995). *L'erreur de Descartes : La raison des émotions*. Paris : Odile Jacob.

DAMASIO, A. (1999). *Le sentiment même de soi : Corps, émotion, conscience*. Paris : Odile Jacob.

DAMASIO, A. (2000). Le cerveau et l'esprit, Dossier « La science en 2050 ». *Pour la Science*, 267, 76-81.

DAMASIO, A. (2017). *L'ordre étrange des choses : La vie, les sentiments et la culture*. Paris : Odile Jacob.

DAMASIO, A., & CARVALHO, G. (2013). The nature of feelings: Evolutionary and neurobiological origins. *Nature Reviews Neuroscience*, 14, 143-152.

DARCOS, X. (2016). *Dictionnaire amoureux de l'École*. Paris : Plon.

DEARY, I., *et al.* (2010). The neuroscience of human intelligence differences. *Nature Reviews Neuroscience*, 11, 201-211.

DECROLY, O. (1929). *La fonction de globalisation et l'enseignement*. Bruxelles : Lamertin.

DECROLY, O. (2009). *Le programme d'une école dans la vie*. Paris : Fabert (éd. originale, 1908).

DEHAENE, S. (Ed.) (1997). *Voir le cerveau en action*. Paris : PUF.

DEHAENE, S. (2007). *Les neurones de la lecture*. Paris : Odile Jacob.

DEHAENE, S. (2008). Cerebral constraints in reading and arithmetic: Education as a « neuronal recycling » process. In BATTRO, A., FISCHER, K., & LÉNA, P. (Eds.), *The Educated Brain: Essays in Neuroeducation*, p. 232-247. Cambridge: Cambridge University Press.

DEHAENE, S. (2010). *La bosse des maths, 15 ans après*. Paris : Odile Jacob.

DEHAENE, S. (Ed.) (2011). *Apprendre à lire : Des sciences cognitives à la classe*. Paris : Odile Jacob.

DEHAENE, S. (2014). *Le code de la conscience*. Paris : Odile Jacob.

DEHAENE, S., & CHANGEUX, J.-P. (2011). Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70, 200-227.

DEHAENE, S., KERSZBERG, M., & CHANGEUX, J.-P. (1998). A neuronal model of global workspace in effortful cognitive tasks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95, 14529-14534.

DEHAENE-LAMBERTZ, G., & SPELKE, E. (2015). The infancy of the human brain. *Neuron*, 88, 93-109.

DELLA SALA, S., & ANDERSON, M. (2011). *Neuroscience in Education: The Good, the Bad and the Ugly*. Oxford and New York: Oxford University Press.

DIAMOND, A. (2015). Effects of physical exercise on executive functions: Going beyond simply moving to moving with thought.

DIAMOND, A. (2016). Why assessing and improving executive functions early in life is critical. In P. MCCARDLE, L. FREUND, & J. GRIFFIN (Eds.), *Executive Function in Preschool-age children: Integrating Measurement, Neurodevelopment, and Translational research*, p. 11-43. Washington, DC: American Psychological Association.

DIAMOND, A. *et al.* (2007). Preschool program improves cognitive control, *Science*, 318, 1387-1388.

DIAMOND, A., & LEE, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science*, 333, 959-964.

DIAMOND, A., & LING, D. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 34-48.

DIEKELMANN, S., & BORN, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*, 11, 114-126.

DIKKER, S., *et al.* (2017). Brain-to-brain synchrony tracks real-world dynamic group interactions in the classroom. *Current Biology*, 27, 1-6.

DONATO, F., *et al.* (2013). Parvalbumin-expressing basket-cell network plasticity induced by experience regulates adult learning. *Nature*, 504, 272-276.

DUCRET, J.-J. (1990). *Jean Piaget : Biographie et parcours intellectuel*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.

DUSTMAN, R., *et al.* (1999). Life-span changes in EEG spectral amplitude, amplitude variability and mean frequency. *Clinical Neurophysiology*, 110, 1399-1409.

DYE, M., & BAVELIER, D. (2010). Differential development of visual attention skills in school-age children. *Vision Research*, 50, 452-459.

EGYED, K., *et al.* (2013). Communicating shared knowledge in infancy. *Psychological Science*, 24, 1348-1353.

EUSTACHE, F., & DESGRANGES, B. (2012). *Les chemins de la mémoire*. Paris : le Pommier.

EUSTACHE, F., & GUILLERY-GIRARD, B. (2016). *La neuroéducation : La mémoire au cœur des apprentissages*. Paris : Odile Jacob.

FIAS, W. (2003). Parietal representation of symbolic and nonsymbolic magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15, 47-56.

FOURNIER, M. (2016a). La pédagogie Montessori fait ses preuves. In M. FOURNIER (Ed.), *Éduquer et former*, p. 77. Auxerre : Sciences Humaines Édition.

FOURNIER, M. (2016b). Enquête sur la neuropédagogie. In M. FOURNIER (Ed.), *Éduquer et former*, p. 173-177. Auxerre : Sciences Humaines Édition.

FREEMAN, S., *et al.* (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 8410-8415.

FREINET, C. (1994). *Œuvres pédagogiques*. Paris : Seuil.

FREINET, C. (1999). L'imprimerie à l'école. In textes choisis par H. PEYRONIE, *Célestin Freinet : Pédagogie et émancipation*, p. 73-76. Paris : Hachette (éd. originale, 1929).

FREINET, C. (2016). *Le maître insurgé : Articles éditoriaux 1920-1939*. Paris : Éditions Libertalia.

FUSTER, J. (1997). *The Prefrontal Cortex*. New York: Raven Press.

FUSTER, J. (2003). *Cortex and Mind*. Oxford and New York: Oxford University Press.

GABRIELI, J. (2009). Dyslexia: A new synergy between education and cognitive neuroscience. *Science*, 325, 280-283.

GALLAGHER, H., & FRITH, C. (2003). Functional imaging of theory of

mind. *Trends in cognitive Sciences*, 7, 77-83.

GARDNER, H. (1997). *Les formes de l'intelligence*. Paris : Odile Jacob.

GASER, C., & SCHLAUG, G. (2003). Brain structures differ between musicians and non-musicians. *Journal of Neuroscience*, 23, 9240-9245.

GLASEL, H. (2013). *Une école sans échec : L'enfant en difficulté et les sciences cognitives*. Paris : Odile Jacob.

GOPNIK, A. (2012a). *Le bébé philosophe*. Paris : Poche - Le Pommier.

GOPNIK, A. (2012b). Scientific thinking in young children. Theoretical advances, empirical research and policy implications. *Science*, 337, 1623-1627.

GOPNIK, A. (2017). *Anti-manuel d'éducation*. Paris : Le Pommier.

GOTTLIEB, J., *et al.* (2013). Information seeking, curiosity, and attention: Computational and neural mechanisms. *Trends in Cognitive Sciences*, 17, 585-596.

GREEN, C., & BAVELIER, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, 423, 534-537.

GREEN, C., & BAVELIER, D. (2008). Exercising your brain: A review of human brain plasticity and training-induced learning. *Psychological Aging*, 23, 692-701.

GREEN, C., *et al.* (2010). Improved probabilistic inference, as a general learning mechanism with action video games. *Current Biology*, 17, 1573-1579.

GREENLAND, S. (2014). *Un cœur tranquille et sage*. Paris : Les Arènes.

GRUBER, M., *et al.* (2014). States of curiosity modulate hippocampus-dependent learning via the dopaminergic circuit. *Neuron*, 84, 486-496.

HAMLIN, P., *et al.* (2007). Social evaluation by preverbal infants. *Nature*, 450, 557-560.

HARRIS, P., (2007). *L'imagination : son rôle crucial dans le développement cognitif et affectif*. Paris : Retz.

HOWARD-JONES, P. (2014). Neuroscience and education: Myths and messages. *Nature Reviews Neuroscience*, 15, 817-824.

HOUDÉ, O. (Ed.) (1998). *Vocabulaire de sciences cognitives*. Paris : PUF (réédition Quadrige 2003).

HOUDÉ, O. (2000). Inhibition and cognitive development: Object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development*, 15, 63-73.

HOUDÉ, O. (2004). *La psychologie de l'enfant*. Paris : PUF.

HOUDÉ, O. (2007). First insights on neuropsychology of reasoning. *Thinking & Reasoning*, 13, 81-89.

HOUDÉ, O. (2008). Pedagogy, not (only) anatomy of reasoning. *Trends in Cognitive Sciences*, 12, 173-174.

HOUDÉ, O. (2011). Développement cognitif de l'enfant. In A. DANION-GRILLIAT et C. BURSSTEIN (Eds.), *Psychiatrie de l'enfant*, p. 60-64. Paris : Lavoisier - Médecine Sciences.

HOUDÉ, O. (2014). *Le raisonnement*. Paris : PUF.

HOUDÉ, O. (2016a). *Histoire de la psychologie*. Paris : PUF.

HOUDÉ, O. (2016b). Les écrans changent-ils le cerveau ? In M. FOURNIER (Ed.), *Éduquer et former*, p. 243-252. Auxerre : Sciences Humaines Édition.

HOUDÉ, O. (2017a). Les sciences cognitives et les apprentissages à l'école primaire. In A. BENTOLILA (Ed.), *L'essentiel de la pédagogie*, p. 69-90. Paris : Nathan.

HOUDÉ, O. (2017b). *Apprendre à résister : Pour l'école, contre la terreur*. Paris : Le Pommier (nouvelle édition augmentée, 1^{re} éd., 2014).

HOUDÉ, O., et al. (2000). Shifting from the perceptual brain to the

logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 721-728.

HOUDÉ, O., *et al.* (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: Evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14, 1486-1492.

HOUDÉ, O., *et al.* (2002). *Cerveau et psychologie : Introduction à l'imagerie cérébrale anatomique et fonctionnelle*. Paris : PUF (1^{re} éd., 2010).

HOUDÉ, O., *et al.* (2010). Mapping numerical processing, reading, and executive functions in the developing brain: An fMRI meta-analysis on 52 studies including 842 children. *Developmental Science*, 13, 876-885.

HOUDÉ, O., *et al.* (2011). Functional MRI study of Piaget's conservation-of-number task in preschool and school-age children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110, 332-346.

HOUDÉ, O., & BORST, G. (2018). *Mon cerveau*. Paris : Nathan.

HOUDÉ, O., & GUICHART, E. (2001). Negative priming effect after inhibition of number/length interference in a Piaget-like task. *Developmental Science*, 4, 71-74.

HOUDÉ, O., & TZOURIO-MAZOYER, N. (2003). Neural foundations of logical and mathematical cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 507-514.

HURON, C. (2011). *L'enfant dyspraxique*. Paris : Odile Jacob.

HUMPHRIES, C., *et al.* (2010). Tonotopic organization of human auditory cortex. *NeuroImage*, 50, 1202-1211.

INHELDER, B., & PIAGET, J. (1955). *De la logique de l'enfant à la logique de l'adolescent*. Paris : PUF.

INHELDER, B., & PIAGET, J. (1959). *La genèse des structures logiques élémentaires*. Neuchâtel : Delachaux & Niestlé.

JAEGGI, S. *et al.* (2008). Improving fluid intelligence with training on working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 6829-6833.

JOHNSON, M. (2001). Functional brain development in humans. *Nature Reviews Neuroscience*, 2, 475-483.

KAHNEMAN, D. (2012). *Système 1, Système 2 : Les deux vitesses de la pensée*. Paris : Flammarion.

KANDEL, E. (2006). *À la recherche de la mémoire : Une nouvelle théorie de l'esprit*. Paris : Odile Jacob.

KANG, M., *et al.* (2009). The wick in the candle of learning: Epistemic curiosity activates reward circuitry and enhances memory. *Psychological Science*, 20, 963-973.

KANG, S., *et al.* (2014). Retrieval practice over the long term: Should spacing be expanding or equal-internal? *Psychonomic Bulletin & Review*, 21, 1544-1550.

KAPLAN, F., & OUDEYER, P.-Y. (2007). In search of the neural circuits of intrinsic motivation. *Frontiers in Neuroscience*, 1, 225-236.

KARPICKE, J., & ROEDIGER, H. (2008). The critical importance of retrieval for learning. *Science*, 319, 966-968.

KLINGBERG, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 14, 317-324.

KLINGBERG, T., & BETTERIDGE, N. (2012). *The Learning Brain: Memory and Brain Development in Children*. Oxford and New York: Oxford University Press.

KLINGBERG, T., *et al.* (2005). Computerized training of working memory in children with ADHD: A randomized, controlled trial. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 44, 177-86.

KORNELL, N. (2009). Optimising learning using flashcards: Spacing is more effective than cramming. *Applied Cognitive Psychology*, 23,

KURDZIEL, L., *et al.* (2013). Sleep spindles in midday naps enhance learning in preschool children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 17267-17272.

LA BORDERIE, R. (2005). *Les grands noms de l'éducation*. Paris : Nathan.

LACHAUX, J.-P. (2011). *Le cerveau attentif*. Paris : Odile Jacob.

LACHAUX, J.-P. (2016). *Petites bulles de l'attention : Se concentrer dans un monde de distractions*. Paris : Odile Jacob.

LANOË, C., *et al.* (2016). Inhibitory control is needed to overcome written verb inflection errors. *Cognitive Development*, 37, 18-27.

LILLARD, A., & ELSE-QUEST, N. (2006). Evaluating Montessori Education. *Science*, 5795, 893-1894.

LOEWENSTEIN, G. (1994). The psychology of curiosity: A review and reinterpretation. *Psychological Bulletin*, 116, 75-98.

LUBAR, J., *et al.* (1984). Electroencephalographic biofeedback of SMR and beta for treatment of attention deficit disorders in a clinical setting. *Biofeedback Self Regulation*, 9, 1-23.

LUBIN, A., *et al.* (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems. *Journal of Educational Psychology*, 105, 701-708.

LURIA, A. (1985). *Les fonctions corticales supérieures de l'homme*. Paris : PUF (éd. originale, 1962).

MAHY, C., *et al.* (2014). How and where: Theory-of-mind in the brain. *Developmental Cognitive neuroscience*, 9, 68-81.

MALSON, L. (2011). *Les enfants sauvages, suivi de Mémoire et rapport sur Victor de l'Aveyron par Jean Itard*. Paris : Les Éditions 10/18.

MASSON, S. (2016). Aider les élèves à transformer leur cerveau en espaçant les périodes d'apprentissage. *Vivre le Primaire* (Revue

professionnelle), 29, 51-52.

McNAB, F., *et al.* (2009). Changes in cortical dopamine D1 receptor binding associated with cognitive training. *Science*, 323, 800-802.

MELTZOFF, A., *et al.* (2009). Foundations for a new science of learning. *Science*, 325, 284-288.

MEYNIEL, F., & DEHAENE, S. (2017). Brain networks for confidence weighting and hierarchical inference during probabilistic learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (in press).

MISCHEL, W., *et al.* (1972). Cognitive and attentional mechanisms in delay of gratification. *Journal of Personality and Social Psychology*, 21, 204-218.

MONTESORI, M. (2001). *L'éducation et la paix*. Paris : Desclée de Brouwer (éd. originale, 1914).

MONTESORI, M. (2006). *L'enfant*. Paris : Desclée de Brouwer (éd. originale, 1936).

MONTESORI, M. (2016). *Le manuel pratique de la méthode Montessori*. Paris : Desclée de Brouwer (éds. originales, 1914, 1939).

MORENO, S., *et al.* (2011). Short-term music training enhances verbal intelligence and executive function. *Psychological Science*, 22, 1425-1433.

MOUTIER, S., *et al.* (2006). Syllogistic reasoning and belief-bias inhibition in schoolchildren. *Developmental Science*, 9, 166-172.

NADEL, L. (Ed.) (2003). *The Encyclopedia of Cognitive Science*. London: Nature Publishing Group - Macmillan.

NEVILLE, H., *et al.* (2013). Family-based training program improves brain function, cognition, and behavior in lower socioeconomic status preschoolers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, 12138-12143.

OLESEN, P., *et al.* (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7, 75-79.

ONISHI, K., & BAILLARGEON, R. (2005). Do 15-month-old infants understand false beliefs? *Science*, 308, 255-258.

PASQUINELLI, E. (2015). *Mon cerveau, ce héros : Mythes et réalité*. Paris : Le Pommier.

PASQUINELLI, E., *et al.* (2013). *Les écrans, le cerveau et l'enfant : Un projet d'éducation à un usage raisonné des écrans pour l'école primaire*. Paris : Le Pommier.

PEIGNEUX, P., *et al.* (2004). Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep? *Neuron*, 44, 535-545.

PERFORS, A., *et al.* (2011). A tutorial introduction to Bayesian models of cognitive development. *Cognition*, 120, 302-321.

PETERSEN, S., & POSNER, M. (2012). The attention system of the human brain. *Annual Review of Neuroscience*, 35, 71-89.

PEYRONIE, H. (1999). *Célestin Freinet : Pédagogie et émancipation*. Paris : Hachette.

PIAGET, J. (1936). *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

PIAGET, J. (1937). *La construction du réel chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

PIAGET, J. (1945). *La formation du symbole chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

PIAGET, J. (1970). *L'épistémologie génétique*. Paris : PUF.

PIAGET, J. (1972). *Où va l'éducation ?* Paris : Gallimard.

PIAGET, J. (1981-1983). *Le possible et le nécessaire 1 et 2*. Paris : PUF.

PIAGET, J. (2012). *La psychologie de l'intelligence*. Paris : Armand Colin (éd. originale, 1947).

PIAGET, J., *et al.* (1990). *Morphismes et catégories : Comparer et transformer*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

PIAGET, J., & GARCIA, R. (1987). *Vers une logique des significations*. Genève : Murionde.

PIAGET, J., & INHELDER, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Paris : PUF.

PIAGET, J., & SZEMINSKA, A. (1941). *La genèse du nombre chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé.

PIATTELLI-PALMARINI, M. (Ed.) (1979). *Théories du langage, théories de l'apprentissage*. Paris : Seuil.

PINEL, P., *et al.* (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41, 983-993.

POIL, S., *et al.* (2014). Age dependent electroencephalographic changes in attention-deficit/hyperactivity disorder (ADHD). *Clinical Neurophysiology*, 125, 1626-1638.

POSNER, M. (1993). Seeing the Mind. *Science*, 262, 673-674.

POSNER, M. & ROTHBART, M. (2007). *Educating the Human Brain*. Washington: American Psychological Association.

PRADO, J., & NOVECK, I. (2007). Overcoming perceptual features in logical reasoning: A parametric functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19, 642-657.

RAICHLE, M., *et al.* (1994). Practice-related changes in human brain functional anatomy during nonmotor learning. *Cerebral Cortex*, 4, 8-26.

RATCLIFF, M. (2010). *Bonjour Monsieur Piaget : Images d'une vie*. Paris : Somogy Éditions d'Arts ; Genève : Archives Jean Piaget.

REEVES, H. (1990). *Malicorne*. Paris : Le Seuil.

REISSE, J., & RICHELLE, M. (2014). *L'Homme : Un animal comme les autres ?* Bruxelles : Éditions de l'Académie Royale de Belgique.

RICHELLE, M. (1977). *B. F. Skinner ou le péril behavioriste*. Bruxelles : Mardaga.

ROHRER, D., & TAYLOR, K. (2006). The effects of overlearning and distributed practise on the retention of mathematics knowledge. *Applied Cognitive Psychology*, 20, 1209-1224.

RUEDA, M., *et al.* (2005). Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102, 14931-14936.

SAKAI, K., *et al.* (1998). Transition of brain activation from frontal to parietal areas in visuomotor sequence learning. *Journal of Neuroscience*, 18, 1827-1840.

SCHELLENBERG, E. (2004). Music lessons enhance IQ. *Psychological Science*, 15, 511-514.

SCHULTZ, W. (2016). Dopamine reward prediction-error signalling. *Nature Reviews Neuroscience*, 17, 183-195.

SCHULTZ, W., *et al.* (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science*, 275, 1593-1599.

SENJU, A., & CSIBRA, G. (2008). Gaze following in human infants depends on communicative signals. *Current Biology*, 18, 668-671.

SERON, X. (2011). Can teachers count on mathematical neurosciences? In M. DELLA SALA & M. ANDERSON (Eds.), *Neuroscience in Education: The Good, the Bad and the Ugly*, p. 84-110. Oxford and New York: Oxford University Press.

SHALLICE, T. (2004). The fractionation of supervisory control. In M. GAZZANIGA (Ed.), *The Cognitive Neuroscience*, p. 943-956. Cambridge: MIT Press.

SIEGLER, R. (2000). *Intelligence et développement de l'enfant*. Bruxelles : De Boeck.

SIEGLER, R. (2001). *Enfant et raisonnement*. Bruxelles : De Boeck.

SIGMAN, M., *et al.* (2014). Neuroscience and education: Prime time to build the bridge. *Nature Neuroscience*, 17, 497-502.

SITARAM, R., *et al.* (2017). Closed-loop brain training: The science of neurofeedback. *Nature Reviews Neuroscience*, 18, 86-100.

SKINNER, B. (1968). *The Technology of Teaching*. NJ: Prentice-Hall (traduction française, *La révolution scientifique de l'enseignement*, Bruxelles, Mardaga, 1969).

SNEL, E. (2012). *Calme et attentif comme une grenouille : la méditation pour les enfants*. Paris : Les Arènes.

SPELKE, E. (2000). Core knowledge. *American Psychologist*, 55, 1233-1243.

Stahl, A., & Feigenson, L. (2015). Observing the unexpected enhances infants' learning and exploration. *Science*, 348, 91-94.

STERN, E. (2005). Pedagogy meets neuroscience. *Science*, 310, 745.

SURUGUE, K. & SOUCAIL, D. (2017). *Noé à l'école Montessori*. Paris : Hachette.

TALAVAGE, T., *et al.* (2004). Tonotopic organization in human auditory cortex revealed by progressions of frequency sensitivity. *Journal of Neurophysiology*, 91, 1282-1296.

TANG, Y., *et al.* (2015). The neuroscience of mindfulness meditation. *Nature Reviews Neurosciences*, 16, 213-225.

TANG, Y., & POSNER, M. (2009). Attention training and attention state training. *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 222-227.

TARDIF, M. (2016). Skinner : Du laboratoire à la classe. *Sciences Humaines*, 45, 54-55.

TENENBAUM, J., *et al.* (2011). How to grow a mind: Statistics, structure, and abstraction. *Science*, 331, 1279-1285.

TOKUHAMA-ESPINOSA, T. (2010). *Mind, Brain, and Education Science*. New York: Norton & Company.

TOOTELL, R., *et al.* (1998). From retinotopy to recognition: fMRI in human visual cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 2, 174-83.

VIART, J.-P. (2012). *Un siècle d'école : Toute l'histoire de l'école, de Jules Ferry à nos jours*. Paris : Larousse.

VIDAL, F. (2000). Piaget avant Piaget. Pour une relecture de l'œuvre piagétienne. In O. HOUDÉ & C. MELJAC (Eds.), *L'esprit piagétien : Hommage international à Jean Piaget*, p. 21-37. Paris : PUF.

VYGOTSKI, L. (1985). *Pensée et langage*. Paris : Éditions sociales (éd. originale, 1934).

Waelti, P., *et al.* (2001). Dopamine responses comply with basic assumptions of formal learning theory. *Nature*, 412, 43-48.

WAGNER, U., *et al.* (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, 427, 352-355.

WANG, Q., & BURKHALTER, A. (2007). Area map of mouse visual cortex. *Journal of Computational Neuroscience*, 502, 339-357.

WERKER, J., & HENSCH, T. (2015). Critical periods in speech perception: New Directions. *Annual Review of Psychology*, 66, 173-196.

WILHELM, I., *et al.* (2013). The sleeping child outplays the adult's capacity to convert implicit into explicit knowledge. *Nature Neuroscience*, 16, 391-393.

WILSON, A., *et al.* (2006). Principles underlying the design of «The Number Race», an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions*, 2, 19.

WISE, R. (2004). Dopamine, learning and motivation. *Nature Reviews Neuroscience*, 5, 483-494.

WYNN, K. (2000). Findings of addition and subtraction in infants are robust and consistent. *Child Development*, 71, 1535-1536.

YUICHI, S., *et al.* (1990). Predicting adolescent cognitive and self-regulatory competencies from preschool delay of gratification. *Developmental Psychology*, 26, 978-986.

ZHAO, X., CHEN, L., FU, L., & MAES, J. (2015). « Wesley says » : A children's response inhibition playground training game yields preliminary evidence of transfer effects. *Frontiers in Psychology*: doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00207.

Retrouvez toutes nos publications sur notre site

MARDAGA

Collection : PSY - Théories, débats, synthèses

© 2018 Éditions Mardaga
B-1050 Bruxelles (Belgique)
www.editionsmardaga.com

Illustration de couverture : © Gow27/Fotolia

eISBN : 9782804705640

© 2018, version numérique Primento et Éditions Mardaga

Ce livre a été réalisé par [Primento](#), le partenaire numérique des éditeurs

Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, du présent ouvrage est strictement interdite.

Ce titre a été réalisé avec le soutien de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Service général des Lettres et du Livre.



F É D É R A T I O N
WALLONIE-BRUXELLES